

Grado Universitario en Ingeniería Mecánica
2017-2018

Trabajo Fin de Grado

“Análisis de optimización topológica de estructuras mediante elementos finitos”

Antonio Daniel Pastor Cubel

Tutor

Miguel Marco Esteban

Leganés, 2018

RESUMEN

El ser humano se ha fijado en la naturaleza siempre para crear nuevos diseños. Desde estructuras o edificios imitando los panales de abejas hasta carrocerías inspiradas en animales salvajes. Esta inspiración en el reino animal también ha llegado al campo de los materiales.

Los materiales sólidos convencionales han sido superados, en cuanto a sus propiedades físicas, mecánicas y térmicas, por los materiales celulares ligeros, con una estructura interna similar a la de los materiales que se encuentran en la naturaleza. Pero, para llegar hasta esa geometría tan compleja, hay que formular un problema de optimización de topología con las propiedades del material.

Este problema se resolverá con un script desarrollado en lenguaje Phyton, con el que se optimizarán diferentes volúmenes elementales diseñados mediante el programa de diseño y análisis por elementos finitos Abaqus/CAE. Estos diseños consistirán en un cubo de dimensiones milimétricas a los que se le quitará una parte distinta a cada uno, formando diferentes diseños imitando la estructura interna de los materiales. De todos esos diseños se elegirá el que más resistencia a los esfuerzos tenga.

Una vez elegido el volumen elemental sobre el que se trabajará, se analizará su resistencia a los esfuerzos variando los diferentes parámetros dentro de un rango, que contiene el programa en lenguaje Phyton para hallar la variación del módulo de Young (E). Con los resultados obtenidos, se elegirán los parámetros óptimos que conformarán el volumen elemental.

A continuación, se realizará un análisis del volumen elemental total con una porosidad variable del 10 al 90% para evaluar la variación del módulo de Young en función de la cantidad de material aportado.

Por último, se evaluarán unos casos prácticos modelizados que consistirán en la optimización de un soporte de estantería y de un puente.

Palabras clave: Optimización; Materiales Celulares Ligeros; Análisis Topológico; Abaqus; Phyton.

ABSTRACT

Humans has always set his sights on nature to create new designs. From structures or buildings imitating honeycombs to car bodies inspired by wild animals. This inspiration in the animal kingdom has also reached the field of materials.

Conventional solid materials have been overcome, in terms of their physical, mechanical and thermal properties, by light-weight cellular materials, with an internal structure like the materials found in nature. But, to get to that complex geometry, it's necessary to formulate a topology optimization problem with the properties of the material.

This problem will be solved with a script developed in Phyton language, with which different elementary volumes will be optimized by the finite element design and analysis program Abaqus/CAE. These designs will be a millimetric dimensions cube to which a different part of each one will be removed, forming different designs copying the internal structure of materials. Of all those designs, the one that more resistance to the efforts has will be chosen.

After choosing the elementary volume that will be worked, its effort resistance will be analysed by varying the different parameters within a range, that the Phyton language program contains, to find the variation of Young's modulus. With the obtained results, the optimal parameters that make the elementary volume will be chosen.

Then, an analysis of the total elemental volume will be made with a variable porosity of 10 to 90% to evaluate the variation of the Young's modulus depending on the amount of material contributed.

Finally, two practical cases will be analysed that consists in the optimization of a shelf support and a bridge.

Key words: Optimization; Light-Weight Cellular Materials; Topology Optimization; Abaqus; Phyton.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor Miguel, por haberme ayudado en este trabajo a pesar del poco tiempo del que disponíamos y de estar siempre disponible cuando le necesitaba.

A mis compañeros de universidad, Suraj, Javier, Sara e Inma, por haber vivido unos años muy intensos y que ya forman parte de mi vida. En especial a Alejandra e Isabel, que empezaron esta aventura conmigo y me han ayudado siempre que lo he necesitado, dentro y fuera del campus.

A la *Chupipandi* y a *Torneirou*, que han sido y serán siempre los pilares fundamentales de mi vida. Especialmente a Andrea y a Carlos, que me apoyaron en los momentos más duros. Gracias de corazón.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1. Motivación.....	2
1.2. Objetivos	3
CAPÍTULO 2: Los materiales celulares ligeros.....	4
2.1. Origen y diseño	6
2.2. El método BESO	8
2.3. Fabricación	10
CAPÍTULO 3: Análisis de geometría inicial.....	11
3.1. Diseño con Abaqus/CAE	13
3.2. Análisis y resultados	16
3.2.1. Configuración 1	16
3.2.2. Configuración 2	18
3.2.3. Configuración 3	21
3.2.4. Configuración 4	24
3.3. Conclusiones	28
Capítulo 4: Análisis paramétricos	29
4.1. Parámetros originales	31
4.2. Parámetro <i>ert</i>	32
4.3. Parámetro <i>r_min</i>	34
4.4. Parámetro <i>p</i>	36
4.5. Parámetros óptimos	38
Capítulo 5: Análisis en franja de volúmenes.....	39
5.1. Condiciones iniciales.....	41
5.2. Ensayos en función de la variable <i>vf</i>	42
5.3. Valoración de resultados	43
Capítulo 6: Aplicación del método de optimización en casos reales.....	45
6.1. Soporte de estantería	47
6.2. Puente.....	49
6.3. Valoración de resultados	51
Capítulo 7: Conclusiones de los análisis basados en el método de optimización BESO	52
Capítulo 8: Planificación del proyecto y presupuesto.....	55

8.1. Planificación del trabajo.....	56
8.2. Presupuesto	57
BIBLIOGRAFÍA	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Configuración 1 de volumen elemental.....	13
Figura 2. Configuración 2 de volumen elemental.....	13
Figura 3. Configuración 3 de volumen elemental.....	14
Figura 4. Configuración 4 de volumen elemental.....	14
Figura 5. Propiedades del material asignado a los volúmenes elementales	15
Figura 6. Restricciones de movimiento aplicadas en las caras interiores del volumen elemental del caso 1	16
Figura 7. Cargas aplicadas en las caras exteriores del volumen elemental del caso 1	16
Figura 8. Representación de la tensión soportada por el volumen elemental total en el caso 1 ..	17
Figura 9. Volumen elemental total resultante tras la optimización del caso 1	17
Figura 10. Restricciones al movimiento aplicadas en las caras interiores del volumen elemental del caso 2.....	19
Figura 11. Cargas aplicadas en las caras exteriores del volumen elemental del caso 2	19
Figura 12. Representación de la tensión soportada por el volumen elemental total en el caso 2	20
Figura 13. Volumen elemental total resultante tras la optimización en el caso 2	20
Figura 14. Restricciones al movimiento aplicadas en las caras interiores del volumen elemental del caso 3.....	22
Figura 15. Cargas aplicadas en las caras exteriores del volumen elemental en el caso 3	22
Figura 16. Representación de la tensión soportada por el volumen elemental total en el caso 3	23
Figura 17. Volumen elemental total resultante tras la optimización en el caso 3	23
Figura 18. Restricciones al movimiento aplicadas en las caras interiores del volumen elemental del caso 4.....	25
Figura 19. Cargas aplicadas en las caras exteriores del volumen elemental en el caso 4	25
Figura 20. Representación de la tensión soportada por el volumen elemental total en el caso 4	26
Figura 21. Volumen elemental total resultante tras la optimización del caso 4.....	26
Figura 22. Valores originales del script de optimización	31
Figura 23. Resultados de la optimización del volumen elemental total con valores de ϵ_{rt} de 0.01, 0.03, 0.04 y 0.05	32
Figura 24. Evolución del valor del módulo de Young en función de la variable ϵ_{rt}	33
Figura 25. Resultados de la optimización del volumen elemental total con valores de r_{min} de 1, 2, 4 y 5.....	34
Figura 26. Evolución del valor del módulo E en función de la variable r_{min}	35
Figura 27. Resultados de la optimización del volumen elemental total con valores de p de 1, 2, 4 y 5	36
Figura 28. Evolución del valor del módulo E en función de la variable p	37
Figura 29. Condiciones de contorno aplicadas al volumen elemental para el análisis de fracción de volumen	41
Figura 30. Resultados de la optimización del volumen elemental total con fracción de volumen del 10 al 90%	42
Figura 31. Evolución del módulo de Young en función de la variable v_f	43
Figura 32. Condiciones de contorno aplicadas al soporte de estantería	47
Figura 33. Representación de las deformaciones sufridas por el soporte de estantería.....	48
Figura 34. Resultado de la optimización del soporte de estantería	48
Figura 35. Condiciones de contorno aplicadas al puente	49
Figura 36. Representación de las deformaciones sufridas por el puente	50

Figura 37. Resultado de la optimización del puente	50
Figura 38. Esquema del desarrollo del proyecto.....	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores del módulo de Young de las cuatro configuraciones optimizadas.....	28
Tabla 2. Valores del módulo de Young en función del parámetro ert	32
Tabla 3. Valores del módulo de Young en función del parámetro r_min	34
Tabla 4. Valores del módulo de Young en función del parámetro p	36
Tabla 5. Valores óptimos de las variables ert, r_min y p	38
Tabla 6. Valores del módulo de Young en función de la variable vf.	43
Tabla 7. Desglose del presupuesto del proyecto.....	57
Tabla 8. Coste total del proyecto	58

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1. Motivación

Uno de los retos del ser humano actualmente es la búsqueda de materiales más eficientes, es decir, materiales que con el mínimo volumen soporten el máximo esfuerzo. Para lograr este objetivo, se han investigado desde nuevos tratamientos a los materiales (térmicos, químicos...) hasta la mezcla de dos o más materiales en uno solo para conseguir materiales compuestos que tengan unas propiedades que, por separado, sería imposible conseguir.

Desde hace un tiempo, las investigaciones para mejorar las propiedades de los materiales se centran en optimizar las piezas que se realizan con ellos. Es decir, analizar a nivel infinitesimal los esfuerzos que soportan diferentes estructuras en cada caso concreto y, a partir de ese análisis, utilizar el material justo para que la pieza en cuestión soporte dichos esfuerzos. Como resultado, se tienen los materiales celulares ligeros o *light-weight cellular materials*, que son materiales cuya estructura se basa en la de los materiales que aparecen en la naturaleza, tales como panales de abeja o estructuras óseas de distintos animales. Estos materiales tienen unas propiedades mecánicas, físicas y térmicas muy superiores a las de los materiales convencionales.

Pero para llegar a ese tipo de estructuras, previamente se ha tenido que realizar un análisis de los esfuerzos que va a soportar el material. Esto es posible gracias a las potentes herramientas que existen hoy día en el campo del análisis y simulación por elementos finitos. Con ellos se pueden realizar simulaciones muy precisas de los esfuerzos y deformaciones con unas cargas y unas condiciones de contorno previamente dadas. Este trabajo se basa principalmente en el diseño y análisis por elementos finitos que ofrece el programa Abaqus/CAE, junto a un script desarrollado en lenguaje Python.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo se pueden aplicar en muy amplios y variados aspectos. Por ejemplo, en el campo de la biomedicina o de la aeronáutica, donde la necesidad de utilizar materiales especiales encarece notablemente el precio de los proyectos que se realizan.

1.2. Objetivos

Este trabajo tiene como finalidad analizar volúmenes elementales sometidos a un estado de cargas, a los que se les ha retirado material de distintas partes, para analizar la distribución de esfuerzos en todo el volumen y así elegir cuál de las combinaciones es la más adecuada para soportar el estado de cargas al que se ven sometidos y optimizar la cantidad de material requerido. También se analizará el comportamiento de las variables que intervienen en el proceso de optimización cuando se alteran sus valores.

Para ello, se usarán dos programas: Abaqus/CAE para la simulación de esfuerzos y desplazamientos y el establecimiento de cargas y condiciones de contorno, y Notepad++ para modificar los parámetros del programa de optimización escrito en Phyton, el cual se ejecutará con Abaqus para realizar la optimización del volumen elemental.

El motivo fundamental por el que se realizará este análisis es la optimización de un volumen con un material determinado para una posible aplicación real en distintos ámbitos de la ingeniería, como la biomedicina o la industria del transporte, con el objetivo de reducir el coste de distintas piezas y estructuras para su futura fabricación.

CAPÍTULO 2: Los materiales celulares ligeros

En este capítulo se hablará de la base del trabajo, es decir, los materiales celulares ligeros: qué son y cómo se obtienen.

En la primera parte, se hablará del origen de los materiales celulares ligeros y su obtención mediante el sistema de optimización, que es el método con el cual se van a realizar los diferentes análisis a lo largo del trabajo.

La segunda parte se centrará en explicar el funcionamiento del método de optimización BESO, así como el fundamento de las variables en las que se basa.

La tercera parte explicará el método de fabricación de dichos materiales, de la evolución y perfeccionamiento de dichos métodos, y de la elección del sistema de adición de material por fusión selectiva por láser (SLM) como el más idóneo para la fabricación de estas estructuras.

2.1. Origen y diseño

Antes de descubrirse los métodos de optimización de estructuras mediante elementos finitos, la tarea de diseño de un objeto o estructura recaía en el ingeniero, quien se basaba en cálculos teóricos e intuición para realizar diseños cada vez más eficientes. Pero todo ello se basaba en la utilización de materiales sólidos, los cuales se han ido mejorando a través del tiempo gracias a nuevas técnicas de fabricación o tratamiento. Esta tendencia tuvo un cambio sustancial cuando se empezaron a investigar otro tipo de materiales con una estructura interna diferente a la de los materiales sólidos: los materiales celulares ligeros [1].

Los materiales celulares ligeros son el resultado de imitar las estructuras internas de los materiales presentes en la naturaleza. Se ha descubierto que los materiales con este tipo de estructuras son superiores a los materiales sólidos convencionales en cuanto a propiedades físicas, mecánicas y térmicas se refiere. Además, tienen otra serie de propiedades como la absorción acústica o el blindaje electromagnético.

Las primeras investigaciones sobre materiales celulares ligeros comenzaron con la observación del interior de los esqueletos de algunos seres vivos marinos, especialmente de los huesos de sepias, los cuales poseían una estructura interna muy ligera pero que era capaz de aguantar las altas presiones que se daban en las capas bajas de los mares y océanos [2]. A raíz de seguir observando ciertas estructuras presentes en la naturaleza, se comenzó a imitar este tipo de estructuras para aplicarlas a algunos materiales con el fin de crear objetos más resistentes sometidos a esfuerzos muy grandes.

Se han propuesto diferentes modelos para diseñar materiales con esta estructura, como el *Solid Isotropic Material with Penalization* (Material Isotrópico Sólido con Penalización, SIMP), el cual es ampliamente utilizado para el diseño de microestructuras periódicas de materiales compuestos. Este método, el cual empezó a investigarse a finales de la década de los 80, no cobró relevancia hasta principios de los 90 [3].

Pero el método más utilizado a la hora de optimizar estructuras para encontrar diseños estructurales más rígidos fue, en primer lugar, el *Evolutive Structural Optimization* (Optimización Estructural Evolutiva, ESO), cuya base teórica es la eliminación de zonas de material estructuralmente ineficiente, es decir, que no soportan trabajo bajo una serie de condiciones dadas. El método ESO ha evolucionado de cara no solo a la eliminación

de material en zonas ineficientes sino a la adición de material en zonas de grandes esfuerzos. A este nuevo método se le conoce como *Bidirectional Evolutive Structural Optimization* (Optimización Estructural Evolutiva Bidireccional, BESO). El BESO ha sido desarrollado por Huang y Xie, de tal forma que se han corregido varias debilidades del método original y se ha demostrado que es capaz de generar topologías confiables, por lo que se puede aplicar perfectamente al diseño de microestructuras periódicas de material celular [4]. Este método es el que será utilizado posteriormente para lograr los objetivos del presente trabajo.

2.2. El método BESO

El método BESO es un algoritmo de optimización que consiste en la adición de material en zonas donde la estructura está soportando cargas y la eliminación en zonas donde los esfuerzos sean mínimos o nulos. Este procedimiento de optimización se realiza en base a una *periodic base cell* o “celda base periódica” (PBC), es decir, se toma como base de optimización un cubo o celda, que es el elemento base que constituye la estructura del material.

La base del método de optimización BESO es el cambio de la densidad de los distintos elementos finitos que componen la PBC durante las sucesivas iteraciones. Este cambio de densidad tiene solo dos posibilidades: que el elemento finito sea sólido (densidad del elemento $x_i=1$), o que el elemento finito sea vacío ($x_i=0$). La asignación de densidad tendrá como consecuencia la variación de la estructura de la PBC hasta que se cumplan las condiciones impuestas. [5]

A la hora de realizar la optimización utilizando el método BESO, la explicación por la que se optimiza únicamente la PBC, y no el material completo, es porque se puede asumir que el tensor de tensiones soportado por el material es igual que el tensor de tensiones de la celda base.

El método BESO utiliza 3 variables, además de la fracción de volumen, para realizar la optimización de forma que los resultados que aparezcan tras producirse sean reales y posibles físicamente. Una de ellas es el exponente de penalización o *penalty exponent* (p). Esta variable es utilizada al considerar que el material de un elemento de la PBC es isotrópico y su módulo de Young se puede considerar de la siguiente forma:

$$E(x_i) = E_1 x_i^p$$

donde:

- E_1 es el módulo de Young del elemento sólido.
- x_i es la densidad del elemento i -ésimo.
- p es el exponente de penalización.

Esta variable p toma siempre valores mayores que 1 para garantizar que la solución de la optimización resulte en un diseño sólido o vacío, sin valores intermedios de densidad.

Una segunda variable es la denominada radio de filtro o *filter radius* (r_{min}). Aparece para paliar posibles problemas en los que la optimización depende del tamaño de la malla, o para evitar que se formen estructuras de elementos finitos en forma de tablero de ajedrez (elementos sólidos y vacíos alternándose en cuadrícula), utilizando una variable que actúa como filtro, que promedia el número de sensibilidad elemental con los elementos contiguos [4]. Dicha variable de filtro será utilizada a la hora de realizar las iteraciones por el programa, realizando una media entre el valor de la variable en esa iteración y el valor en la iteración anterior.

Por último, la tercera variable es la tasa de evolución o *evolution rate* (ert). Esta variable se utiliza para mantener la restricción de volumen aplicada al principio de la optimización dentro del rango establecido. Funciona según la siguiente ecuación:

$$f_V = \max\{f_V(1 - ert), f_{Vo}\}$$

donde:

- f_V es la fracción de volumen correspondiente a esa iteración.
- ert es la tasa de evolución, cuyo valor normalmente es del 2%.
- f_{Vo} es la fracción de volumen impuesta al principio de la optimización.

La variable ert sirve para reducir el valor de la fracción de volumen en una iteración cuando este porcentaje de fracción de volumen supera el valor inicial de fracción de volumen dada en las condiciones de contorno [6].

El método BESO es una evolución del método ESO, aunque recientemente se han desarrollado muchos más métodos de optimización similares, como el *Additive Evolutionary Structural Optimization* (AESO), *Biological Growth Structural Optimization* (BGSO), *Group Evolutionary Structural Optimization* (GESO) o *Morphing Evolution Structural Optimization* (MESO). El método BESO es el que se utilizará en los análisis presentes en este trabajo por ser el método más fiable de optimización [1].

2.3. Fabricación

Las buenas propiedades de los materiales celulares ligeros hacen que este tipo de material sea utilizado para diversas aplicaciones de gran relevancia, como por ejemplo en el campo de la aeronáutica o de la biomedicina. Sin embargo, es difícil fabricar este tipo de estructuras internas con los métodos de fabricación tradicionales.

Para dar solución a este problema, se están madurando diferentes métodos de fabricación, como las técnicas de impresión 3D. Sin embargo, la técnica que mejor resultado está dando es la fusión selectiva por láser (SLM). Este proceso permite producir piezas metálicas capa a capa mediante un láser, controlado por un ordenador, que funde el metal para crear la pieza.

Este método de fabricación fue elegido debido a que se escogió el diseño de estructura de celosía simple frente al diseño de estructura de celosía basada en una función, el cual era más simple desde el punto de vista de la optimización. A pesar de ser un diseño más simple, esta estructura es difícil de traducir a la fabricación debido a la compleja forma geométrica que tiene este diseño en la realidad.

Diversos investigadores, como Dong-Ming Xiao y Vivien J. Challis, realizaron diversos experimentos con estructuras óseas optimizadas topológicamente y verificaron que el proceso de fusión selectiva por láser era válido para la fabricación de este tipo de estructuras utilizando titanio como material de fabricación. Posteriormente, dichas estructuras fueron analizadas a diferentes ensayos de compresión, con resultados altamente satisfactorios [7].

Por tanto, se puede concluir que los materiales celulares ligeros poseen unas propiedades excepcionales para el soporte de cargas y que la fabricación de piezas con esta estructura interna es viable gracias a los métodos de fabricación por adición de material. A pesar de los buenos resultados, se sigue investigando en la mejora de los algoritmos para la optimización de estas estructuras y en el perfeccionamiento de los sistemas de fabricación para su posible uso en masa.

CAPÍTULO 3: Análisis de geometría inicial

En este apartado se procederá a explicar el entorno con el que se va a realizar los diferentes análisis, el programa Abaqus/CAE y un script realizado en lenguaje Python, editable con Notepad++, con los que se diseñarán los volúmenes elementales necesarios para el estudio y se optimizarán para realizar el ensayo. Dichos volúmenes se diferencian entre sí por la zona donde se ha quitado material antes de aplicarse las condiciones de contorno y el estado de cargas.

A continuación, se analizará una octava parte de esos volúmenes elementales para poder trabajar correctamente con las condiciones de contorno en el análisis. Esto se traduce en una restricción de movimiento en las caras interiores del cubo (pertenecientes al corte) y en la imposición de un desplazamiento igual en todas las caras exteriores para que se produzca una deformación y, por tanto, el volumen esté sometido a unos esfuerzos de tracción.

Por último, se comprobará el valor del módulo de Young de los volúmenes analizados y se elegirá el que mayor valor tenga, lo que significa que es la estructura más capaz para aguantar el estado de cargas aplicado.

3.1. Diseño con Abaqus/CAE

El objetivo del análisis es averiguar cuál de las cuatro configuraciones de volúmenes elementales que se van a estudiar tiene un mayor valor de módulo de Young (E). Para ello, se diseñan, mediante el programa de diseño y análisis por elementos finitos Abaqus/CAE, los cuatro volúmenes elementales objeto de estudio. Consta de un cubo de 0.5 mm de arista, al cual se le quita un cubo de 0.05 mm , distinto en cada caso a analizar. Estos volúmenes representan $1/8$ parte del volumen total, ya que se dividen por la mitad en la dirección de los tres ejes (XYZ) para poner de una forma más cómoda las restricciones de movimiento y las fuerzas en las caras del cubo. Cabe señalar que el origen de coordenadas en las cuatro combinaciones está establecido en el vértice común a las tres caras interiores del volumen elemental.

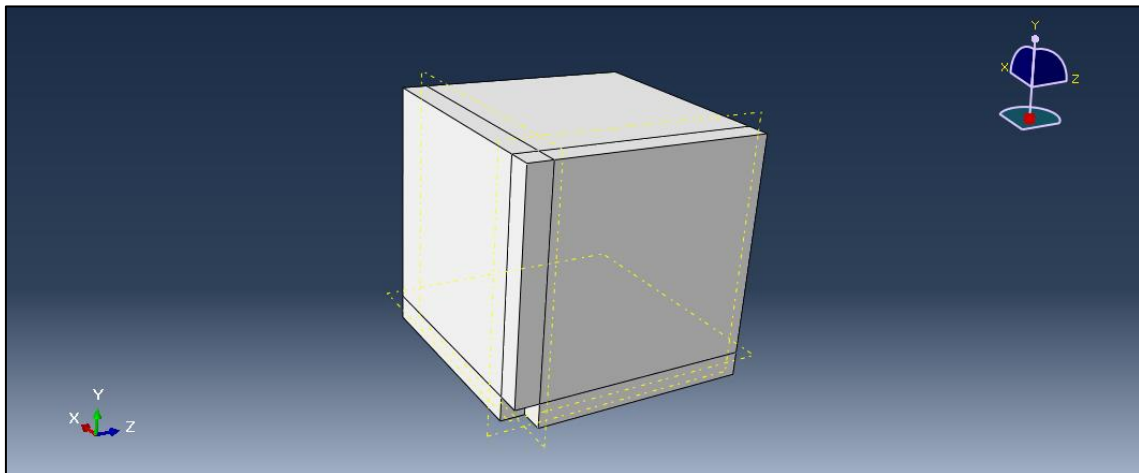


Figura 1. Configuración 1 de volumen elemental

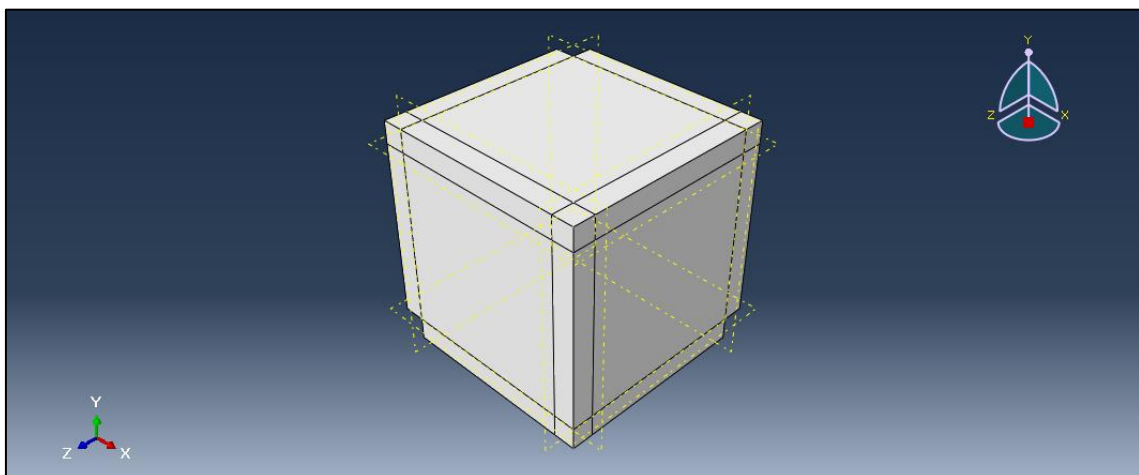


Figura 2. Configuración 2 de volumen elemental

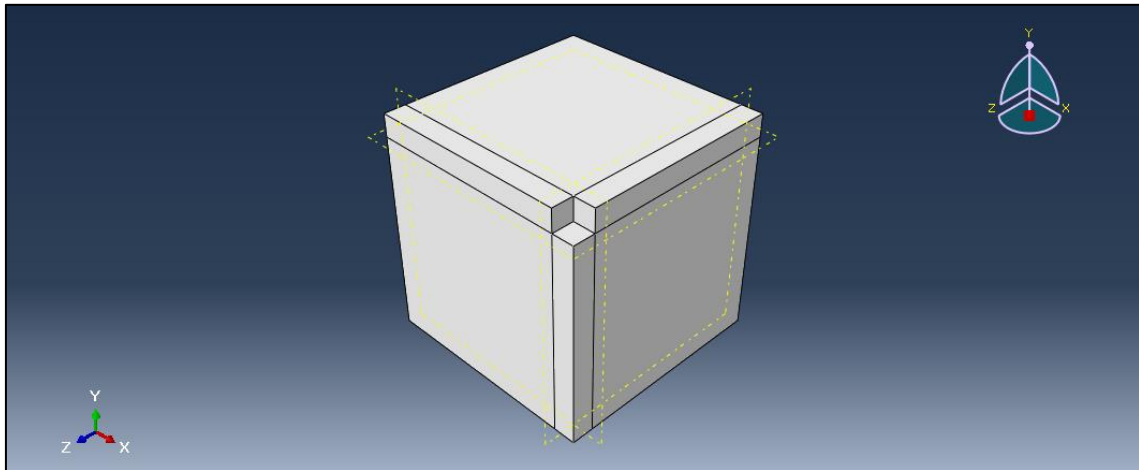


Figura 3. Configuración 3 de volumen elemental

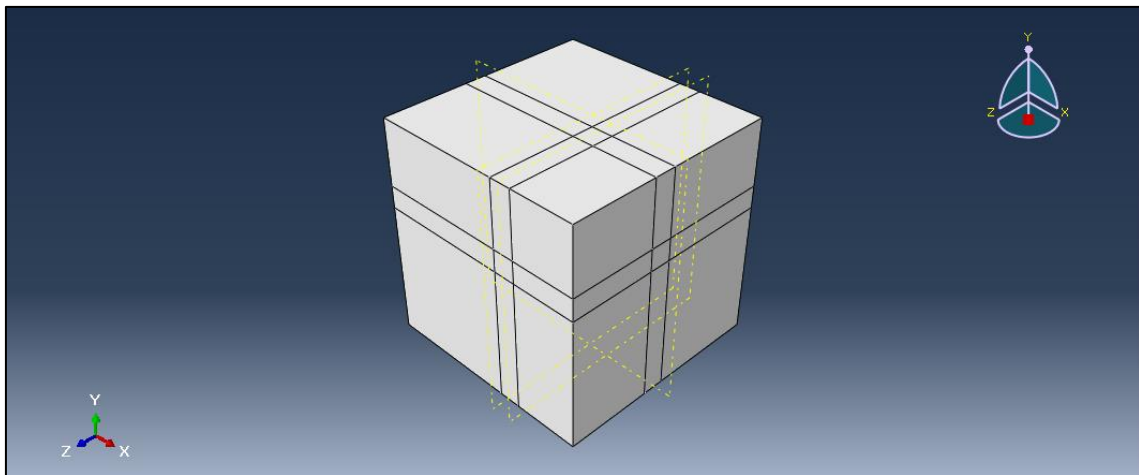
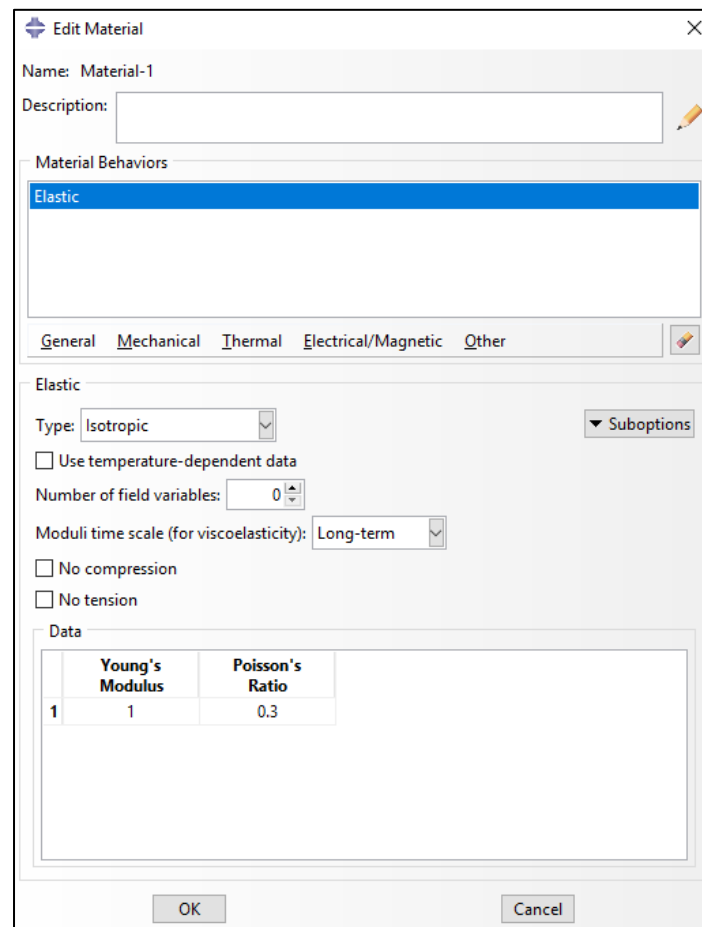


Figura 4. Configuración 4 de volumen elemental

La configuración 1 consiste en eliminar del centro del volumen total un cubo de 0.05 mm de arista. La configuración 2 consiste en eliminar el cubo de 0.05 mm de lado del centro de las caras del volumen total. La configuración 3 se basa en eliminar el mismo cubo de 0.05 mm de arista de las esquinas del volumen elemental total. Por último, la configuración 4 se basa en eliminar el cubo de 0.05 mm de lado del centro de cada una de las 8 particiones en que se divide el volumen elemental total.

Así pues, con las cuatro configuraciones diseñadas, se pasa a asignarles un material con unas propiedades básicas para poder realizar el ensayo. El material para el análisis es elástico, isótropo, con un módulo de Young de valor 1 MPa y con un coeficiente de Poisson de 0.3.



Edit Material

Name: Material-1

Description:

Material Behaviors

Elastic

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Elastic

Type: Isotropic Suboptions

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term

☐ No compression

☐ No tension

Data

	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	1	0.3

OK Cancel

Figura 5. Propiedades del material asignado a los volúmenes elementales

Ya asignado el material a las distintas configuraciones, se procede a especificar las restricciones de movimiento y las cargas a aplicar.

3.2. Análisis y resultados

3.2.1. Configuración 1

Una vez diseñado el volumen a analizar, se pasa a configurar las condiciones de contorno. En las caras correspondientes al corte, y, por tanto, al interior del volumen elemental total, se impone una restricción de movimiento en la dirección perpendicular al plano de la cara del cubo. En las caras vistas, se aplica un desplazamiento de 0.1 mm en la dirección perpendicular a las caras.

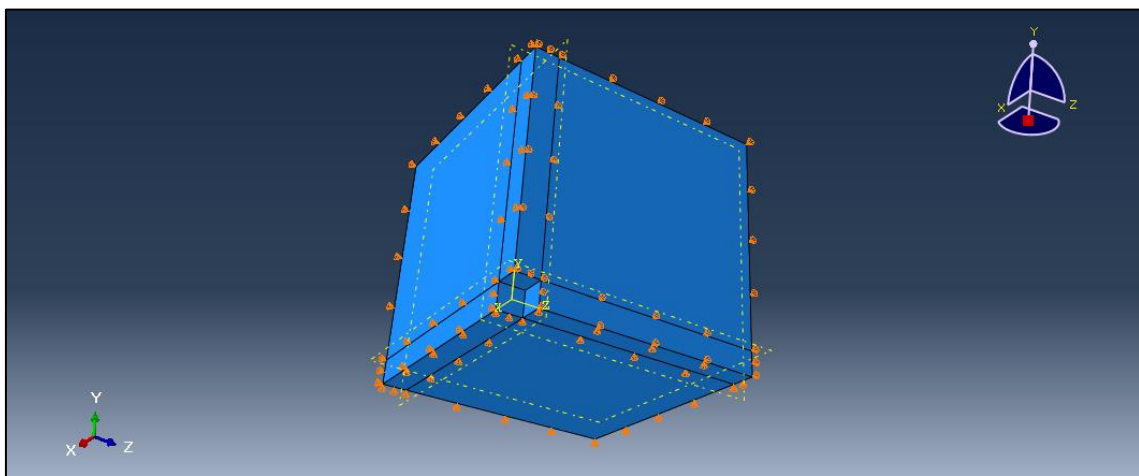


Figura 6. Restricciones de movimiento aplicadas en las caras interiores del volumen elemental del caso 1

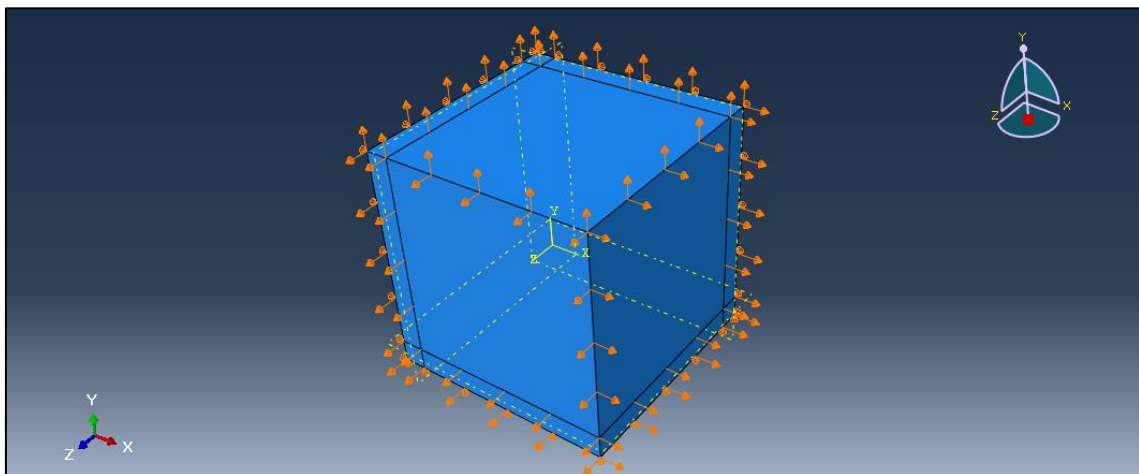


Figura 7. Cargas aplicadas en las caras exteriores del volumen elemental del caso 1

Con todas las condiciones de contorno establecidas, se pasa a continuación a realizar el análisis de optimización con el script, desarrollado en Phyton por Zhi Hao Zuo y Yi Min Xie [5], introduciéndolo en Abaqus, sin alterar ninguno de los parámetros establecidos en el mismo. Este script consiste en una serie de iteraciones en las que el

programa analiza cada una de las partes en las que ha mallado el volumen elemental y sustituye cada partición por el material asignado previamente, si soporta carga dicha partición, o la elimina si el valor de carga soportado es despreciable. Una vez finalizado el análisis tras 47 iteraciones, aparece el volumen elemental total resultante tras la optimización.

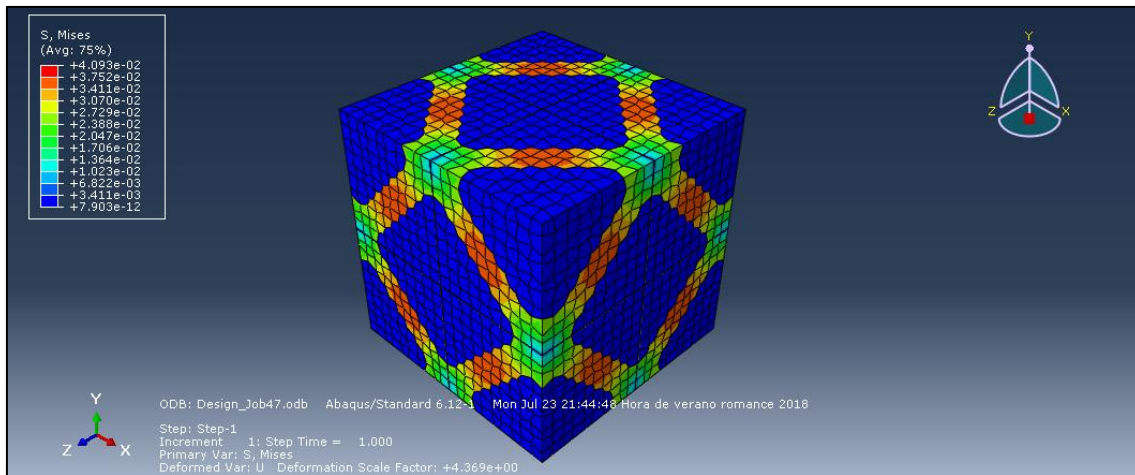


Figura 8. Representación de la tensión soportada por el volumen elemental total en el caso 1

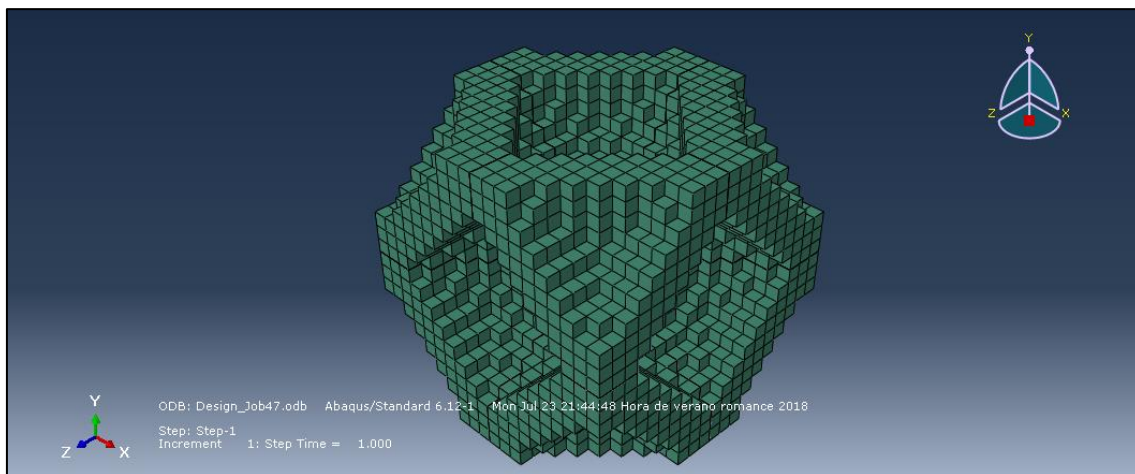


Figura 9. Volumen elemental total resultante tras la optimización del caso 1

Tras la optimización, se obtiene un valor de la fuerza equivalente de 0.00310697 N. Con este dato es posible obtener el valor de la tensión equivalente:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

donde:

- F es la fuerza equivalente, cuyo valor es de 0.00310697 N.

- A es el área del volumen equivalente donde se aplica la carga, cuyo valor es de 0.25 mm^2 .

El valor de la tensión equivalente es:

$$\sigma = 12427.88 \text{ MPa}$$

Con este valor, se puede obtener el dato del módulo de Young (E) equivalente:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

donde:

- σ es la tensión equivalente, cuyo valor es de 12427.88 MPa .
- ε es la deformación sufrida por el volumen elemental, que se calcula de la siguiente forma:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

donde:

- ΔL es el desplazamiento impuesto en las condiciones de contorno, cuyo valor es de 0.01 mm .
- L es la longitud de la arista del volumen elemental, cuyo valor es de 0.5 mm .

El valor de la deformación es:

$$\varepsilon = 0.02$$

Por tanto, el valor del módulo de Young equivalente es:

$$E = 0.621394 \text{ MPa}$$

3.2.2. Configuración 2

En la configuración número 2, las restricciones al movimiento y los desplazamientos se aplican en las mismas caras que en el caso anterior, ya que el ensayo sigue siendo triaxial y el corte para sacar el volumen elemental es el mismo.

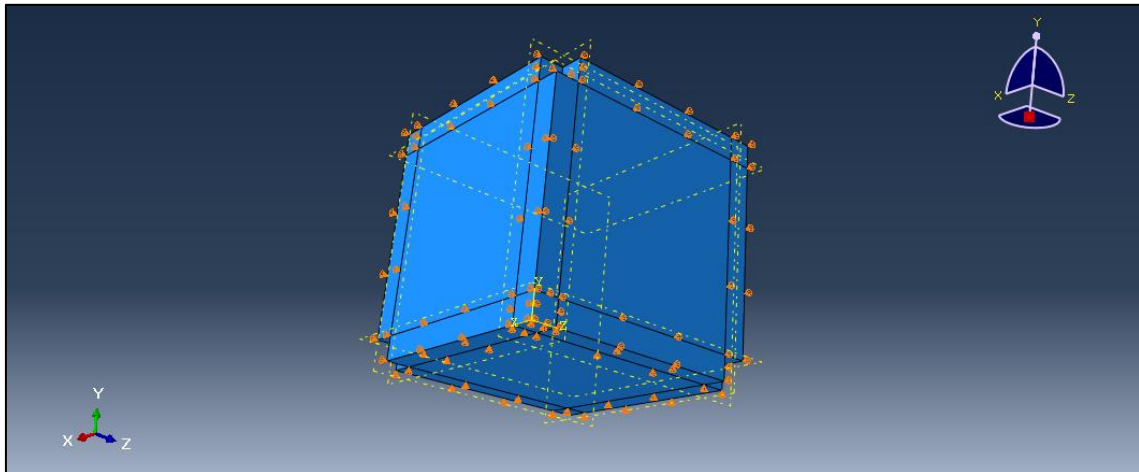


Figura 10. Restricciones al movimiento aplicadas en las caras interiores del volumen elemental del caso 2

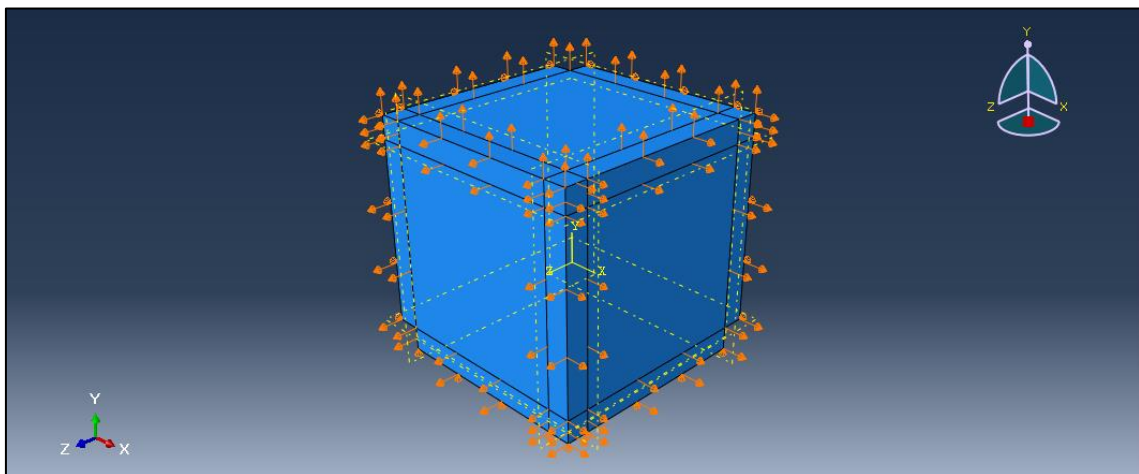


Figura 11. Cargas aplicadas en las caras exteriores del volumen elemental del caso 2

Una vez establecidas las condiciones de contorno, se pasa a optimizar el volumen elemental con el archivo Phyton que, tras 43 iteraciones, nos resulta el volumen elemental total tras la optimización.

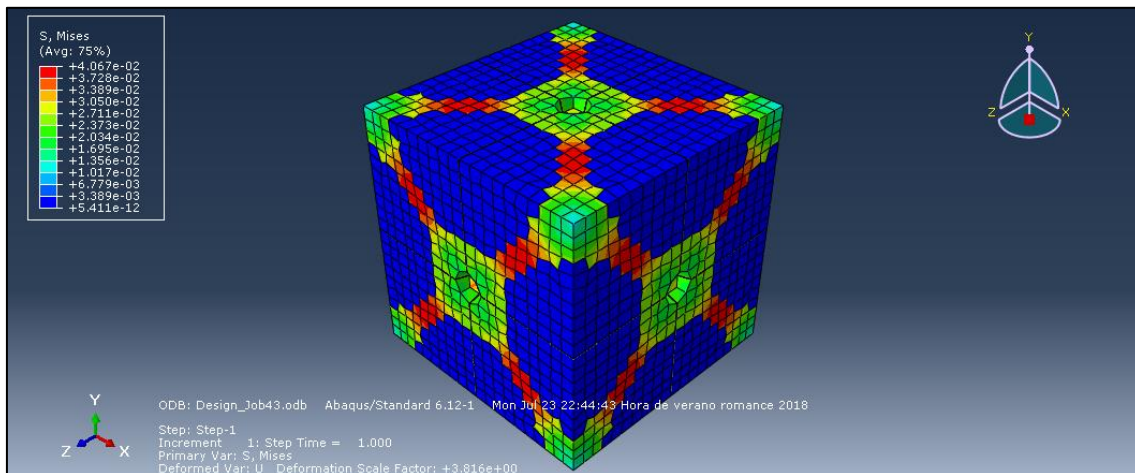


Figura 12. Representación de la tensión soportada por el volumen elemental total en el caso 2

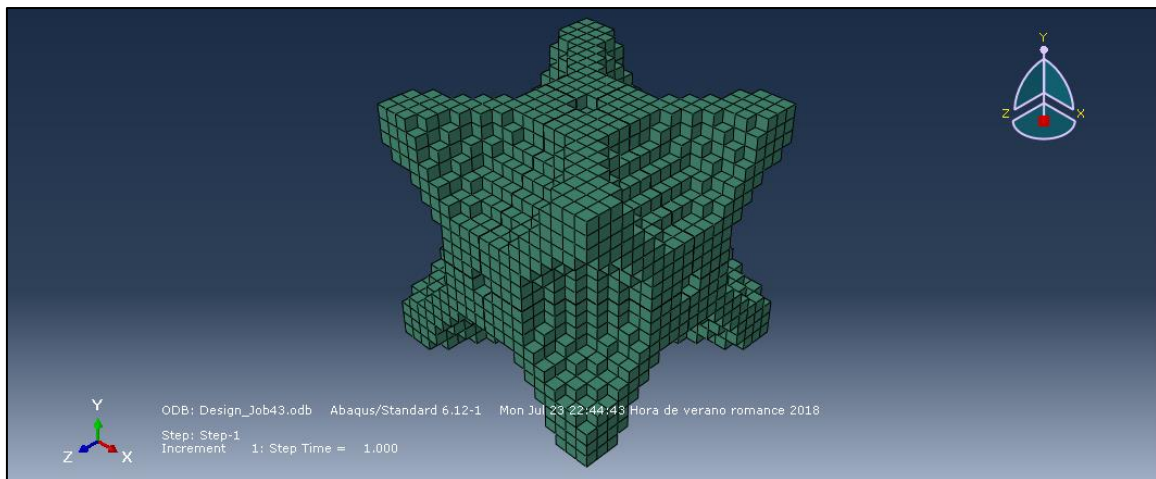


Figura 13. Volumen elemental total resultante tras la optimización en el caso 2

Optimizado el volumen elemental total, se obtiene un valor de la fuerza equivalente de 0.00312526 N. Por tanto, la tensión equivalente se calcula de la siguiente forma:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

donde:

- F es la fuerza equivalente, cuyo valor es de 0.00312526 N.
- A es el área del volumen equivalente donde se aplica la carga, cuyo valor es de 0.25 mm^2 .

El valor de la tensión equivalente es:

$$\sigma = 12501.04 \text{ MPa}$$

Con este valor, se puede obtener el dato del módulo de Young (E) equivalente:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

donde:

- σ es la tensión equivalente, cuyo valor es de 12501.04 MPa.
- ε es la deformación sufrida por el volumen elemental, que se calcula de la siguiente forma:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

donde:

- ΔL es el desplazamiento impuesto en las condiciones de contorno, cuyo valor es de 0.01 mm.
- L es la longitud de la arista del volumen elemental, cuyo valor es de 0.5 mm.

El valor de la deformación es:

$$\varepsilon = 0.02$$

Por tanto, el valor del módulo de Young equivalente es:

$$E = 0.625052 \text{ MPa}$$

3.2.3. Configuración 3

Igual que en los casos anteriores, en la configuración 3 las restricciones al movimiento se ponen en las caras interiores del volumen elemental, que son las equivalentes a las caras pertenecientes al interior del volumen elemental total.

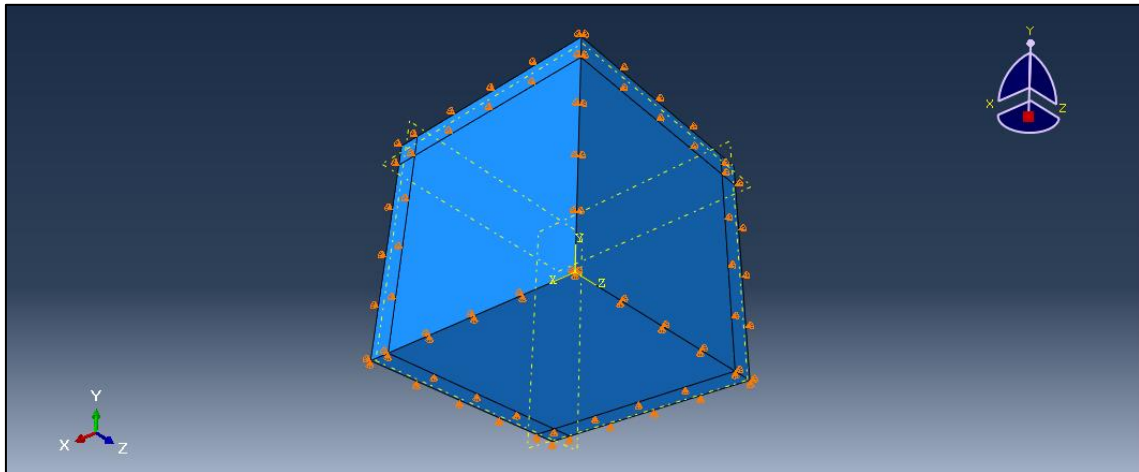


Figura 14. Restricciones al movimiento aplicadas en las caras interiores del volumen elemental del caso 3

Y los desplazamientos de 0.1 mm , como en los casos anteriores, se aplican en las caras exteriores del volumen elemental.

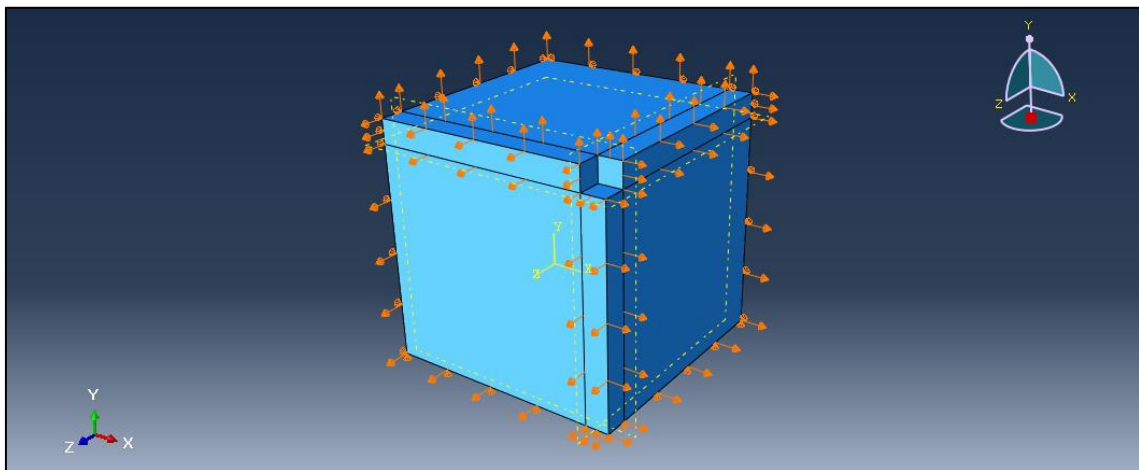


Figura 15. Cargas aplicadas en las caras exteriores del volumen elemental en el caso 3

Realizadas 51 iteraciones por Abaqus mediante el script en Phyton, se llega a la optimización final del volumen elemental del caso 3.

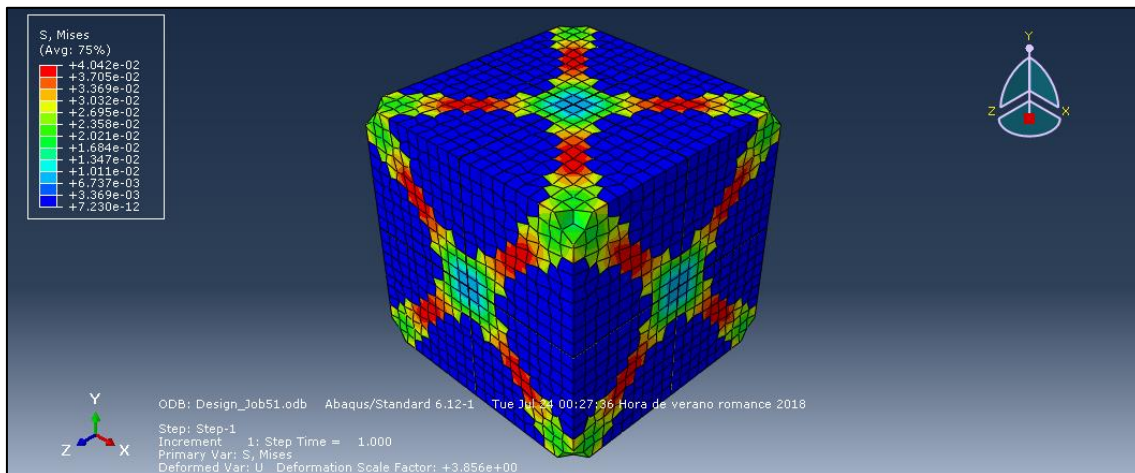


Figura 16. Representación de la tensión soportada por el volumen elemental total en el caso 3

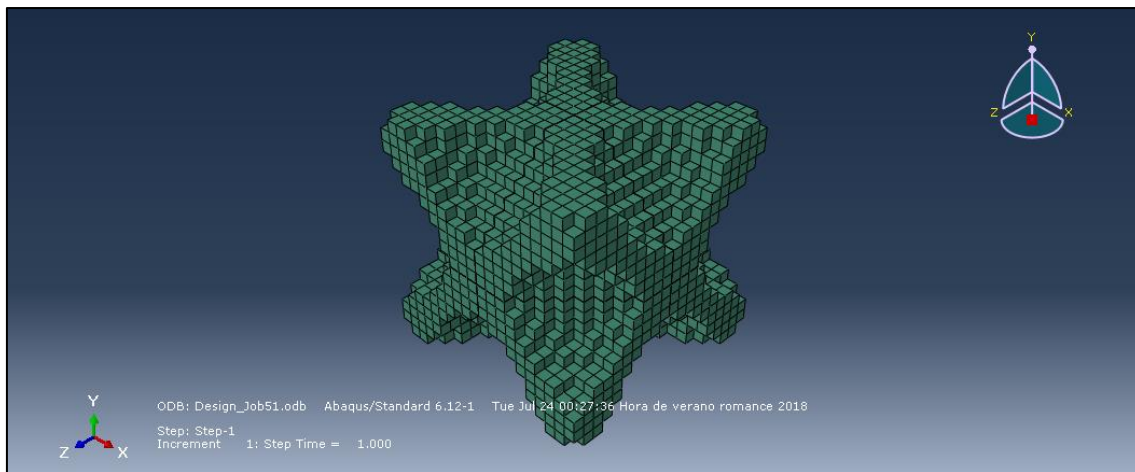


Figura 17. Volumen elemental total resultante tras la optimización en el caso 3

Una vez realizada la optimización, se obtiene un valor de la fuerza aplicada sobre la cara exterior de 0.00316114 N. Con este valor de la fuerza equivalente, es posible calcular la tensión equivalente de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

donde:

- F es la fuerza equivalente, cuyo valor es de 0.00316114 N.
- A es el área del volumen equivalente donde se aplica la carga, cuyo valor es de 0.25 mm².

El valor de la tensión equivalente es:

$$\sigma = 12644.56 \text{ MPa}$$

Con este valor, se puede obtener el dato del módulo de Young (E) equivalente:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

donde:

- σ es la tensión equivalente, cuyo valor es de 12644.56 MPa.
- ε es la deformación sufrida por el volumen elemental, que se calcula de la siguiente forma:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

donde:

- ΔL es el desplazamiento impuesto en las condiciones de contorno, cuyo valor es de 0.01 mm.
- L es la longitud de la arista del volumen elemental, cuyo valor es de 0.5 mm.

El valor de la deformación es:

$$\varepsilon = 0.02$$

Por tanto, el valor del módulo de Young equivalente es:

$$E = 0.632228 \text{ MPa}$$

3.2.4. Configuración 4

El procedimiento es similar al de las configuraciones anteriores: en las caras interiores del volumen elemental se aplica una restricción de movimiento por cada eje de coordenadas, y en las caras exteriores se impone un desplazamiento de 0.1 mm.

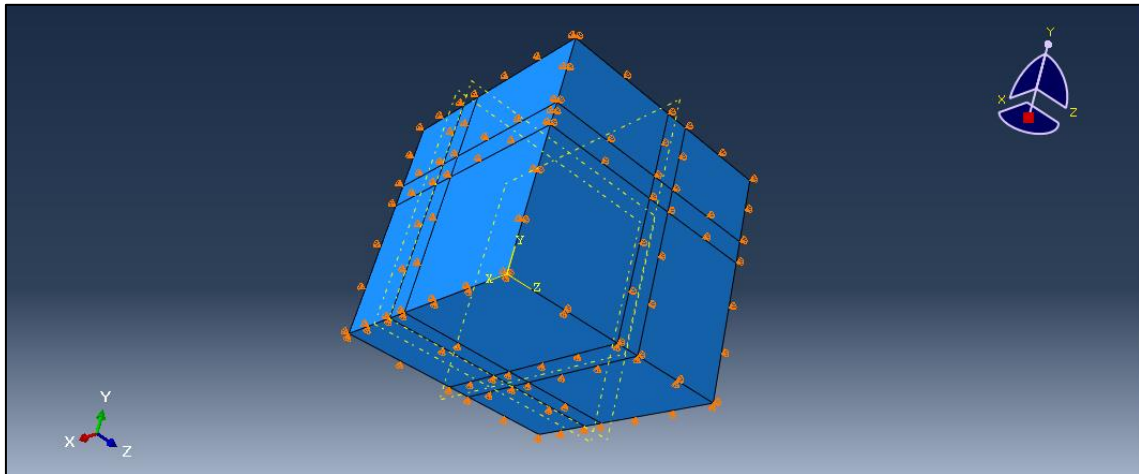


Figura 18. Restricciones al movimiento aplicadas en las caras interiores del volumen elemental del caso 4

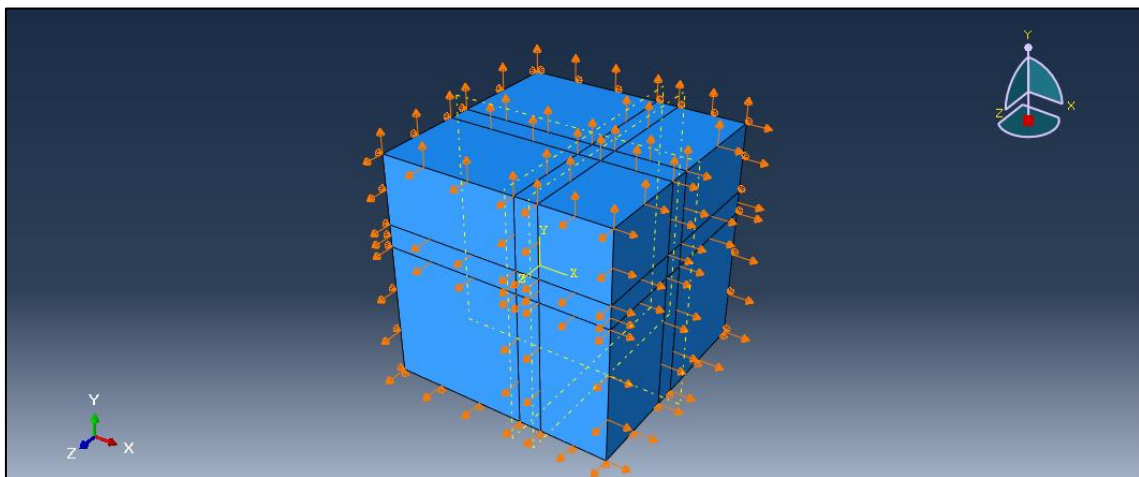


Figura 19. Cargas aplicadas en las caras exteriores del volumen elemental en el caso 4

Una vez el programa realiza las iteraciones oportunas con el script el Python, en este caso 70, Abaqus muestra el resultado de la optimización.

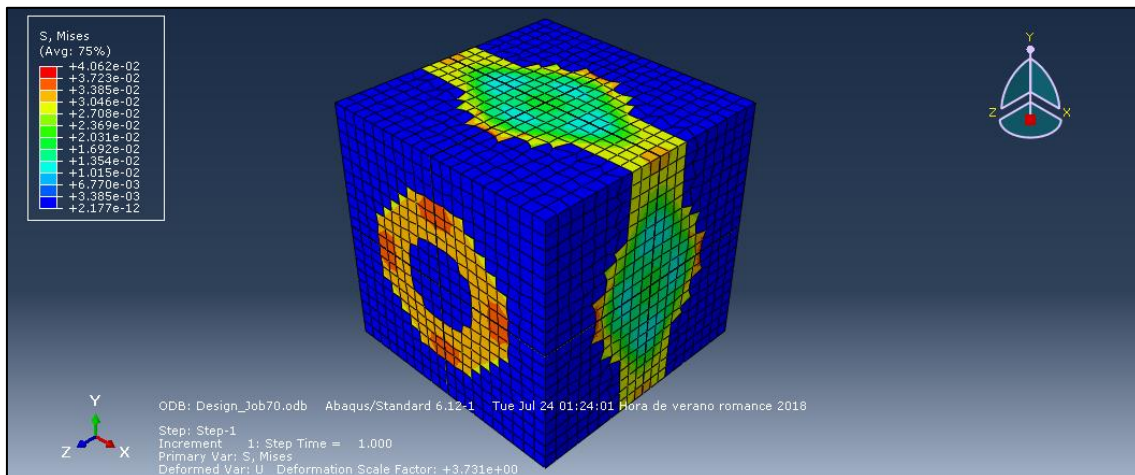


Figura 20. Representación de la tensión soportada por el volumen elemental total en el caso 4

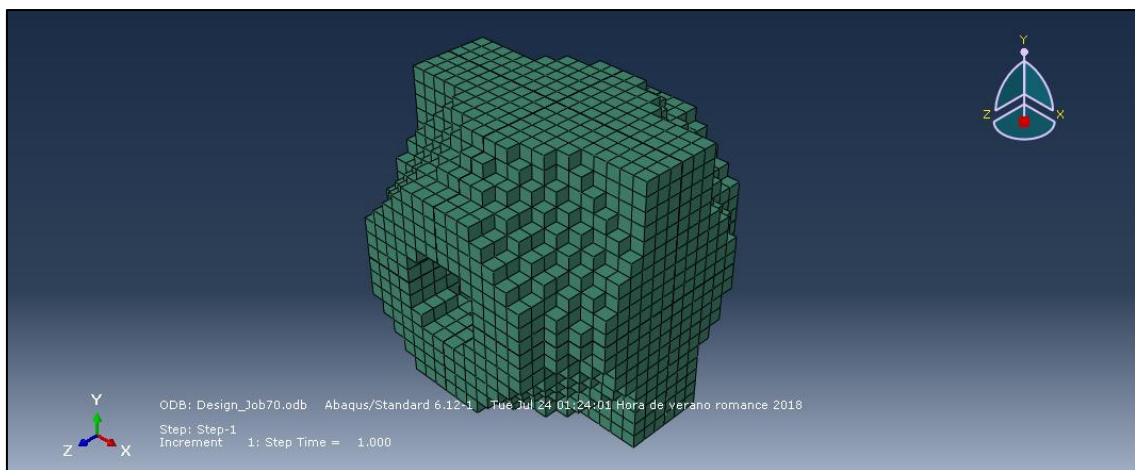


Figura 21. Volumen elemental total resultante tras la optimización del caso 4

Como en el caso anterior, se halla la fuerza equivalente aplicada en la cara exterior del volumen elemental, cuyo valor es de 0.00289948 N. Finalmente, se puede establecer el valor del módulo de Young para la combinación 4:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

donde:

- F es la fuerza equivalente, cuyo valor es de 0.00289948 N.
- A es el área del volumen equivalente donde se aplica la carga, cuyo valor es de 0.25 mm².

El valor de la tensión equivalente es:

$$\sigma = 11597.92 \text{ MPa}$$

Con este valor, se puede obtener el dato del módulo de Young (E) equivalente:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

donde:

- σ es la tensión equivalente, cuyo valor es de 11597.92 MPa.
- ε es la deformación sufrida por el volumen elemental, que se calcula de la siguiente forma:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

donde:

- ΔL es el desplazamiento impuesto en las condiciones de contorno, cuyo valor es de 0.01 mm.
- L es la longitud de la arista del volumen elemental, cuyo valor es de 0.5 mm.

El valor de la deformación es:

$$\varepsilon = 0.02$$

Por tanto, el valor del módulo de Young equivalente es:

$$E = 0.579896 \text{ MPa}$$

3.3. Conclusiones

Tras realizar el análisis de las cuatro configuraciones, se han obtenido sus respectivos módulos de Young, recogidos en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores del módulo de Young de las cuatro configuraciones optimizadas

Configuración	Módulo de Young (MPa)
Configuración 1	0.621
Configuración 2	0.625
Configuración 3	0.632
Configuración 4	0.580

A la vista de los resultados, se puede determinar que la configuración 3 es la más resistente a los esfuerzos debido a que es la que presenta el mayor valor del módulo de Young. Por tanto, los análisis posteriores se basarán únicamente en esta configuración de volumen elemental.

Capítulo 4: Análisis paramétricos

En este apartado se explicará el procedimiento en el que se basarán los análisis efectuados sobre el volumen elemental con la configuración 3, que consistirán en la alteración uno a uno de los diferentes parámetros con los que trabaja el script desarrollado en Python, para analizar la variación del valor del módulo de Young. Los parámetros que se estudiarán son tres: la tasa de evolución o *evolution rate* (ert), el radio de filtro o *filter radius* (r_min) y el exponente de penalización o *penalty exponent* (p). Los valores de estos parámetros variarán dentro de un rango establecido.

Tras finalizar el análisis del volumen elemental, se compararán los valores del módulo de Young obtenidos con cada parámetro y se elegirá el valor del parámetro asociado al mayor valor del módulo de Young obtenido. Con este procedimiento, se establecerán los valores óptimos de los parámetros del script para posteriores análisis.

4.1. Parámetros originales

En el caso anterior en el que se optimizaban los volúmenes elementales con distintas configuraciones, se partía del script en Python con unos valores de los parámetros previamente establecidos [5], recogidos en la Figura 22, los cuales son:

- Tasa de evolución o *evolution rate* (ert) = 0.02
- Radio de filtro o *filter radius* (r_min) = 3
- Exponente de penalización o *penalty exponent* (p) = 3

```
####      VARIABLES      #####
# Set parameters and inputs
vf=0.5 #volume fraction
rmin=0.05*3 #radio minimo en coordenadas (dimension) en el paper: 3*lado del elemento
ert=0.02 #ER en el papel
p=3.0 #variable P para suavizar el cambio
name='analisis_beso.cae'
```

Figura 22. Valores originales del script de optimización

Ahora esos valores serán alterados, dentro de unos intervalos, para evaluar las variaciones en el valor del módulo de Young del volumen elemental. Se van a probar las siguientes combinaciones:

- Parámetro *ert*: valores de 0.01, 0.03, 0.04 y 0.05.
- Parámetro *r_min*: valores de 1, 2, 4 y 5.
- Parámetro *p*: valores de 1, 2, 4 y 5.

Con estos análisis, se evaluarán los valores óptimos para la optimización comparando los valores del módulo de Young y eligiendo aquellos valores de los parámetros relacionados con los mayores valores del módulo de Young. Se tomará como referencia el valor del módulo de Young hallado en el apartado 3.2.3, correspondiente a la configuración 3 con los valores de las variables predeterminados.

4.2. Parámetro *ert*

En este apartado se va a analizar el resultado de la optimización variando el parámetro *ert* del script desarrollado en Phyton, introduciendo los valores mencionados en el apartado anterior.

En primer lugar, se abre el script con el programa Notepad++ y se edita el valor de la variable *ert*. Una vez cambiado el valor, se abre el script con Abaqus mediante una ventana de comandos y se lanza el programa. Tras un número de iteraciones, distintas en cada caso, el programa muestra el resultado de la optimización.

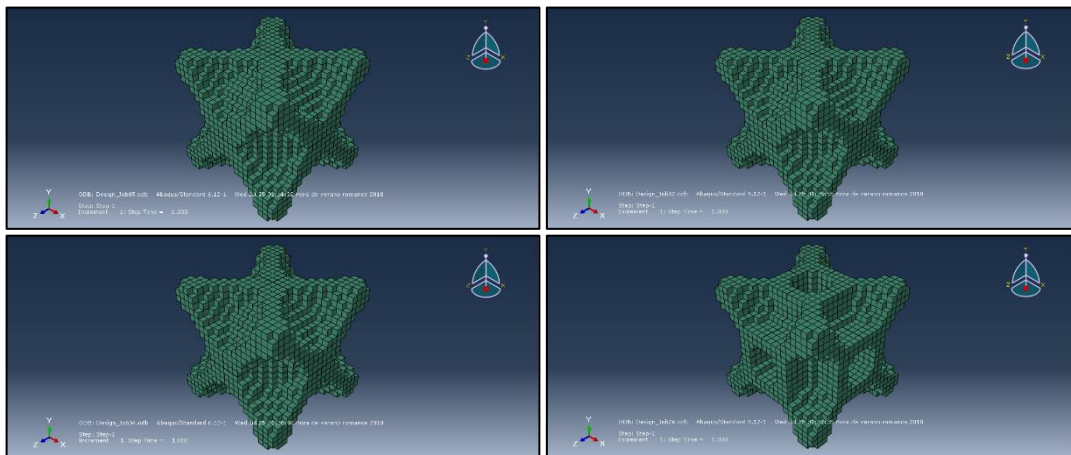


Figura 23. Resultados de la optimización del volumen elemental total con valores de *ert* de 0.01, 0.03, 0.04 y 0.05

Una vez hallados todos los valores del módulo de Young correspondientes a los distintos valores del parámetro *ert*, se elige el que mayor valor tenga. Los valores vienen representados en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores del módulo de Young en función del parámetro *ert*

Valor del parámetro <i>ert</i>	Módulo de Young (MPa)
0.01	0.628
0.02	0.632
0.03	0.624
0.04	0.624
0.05	0.619

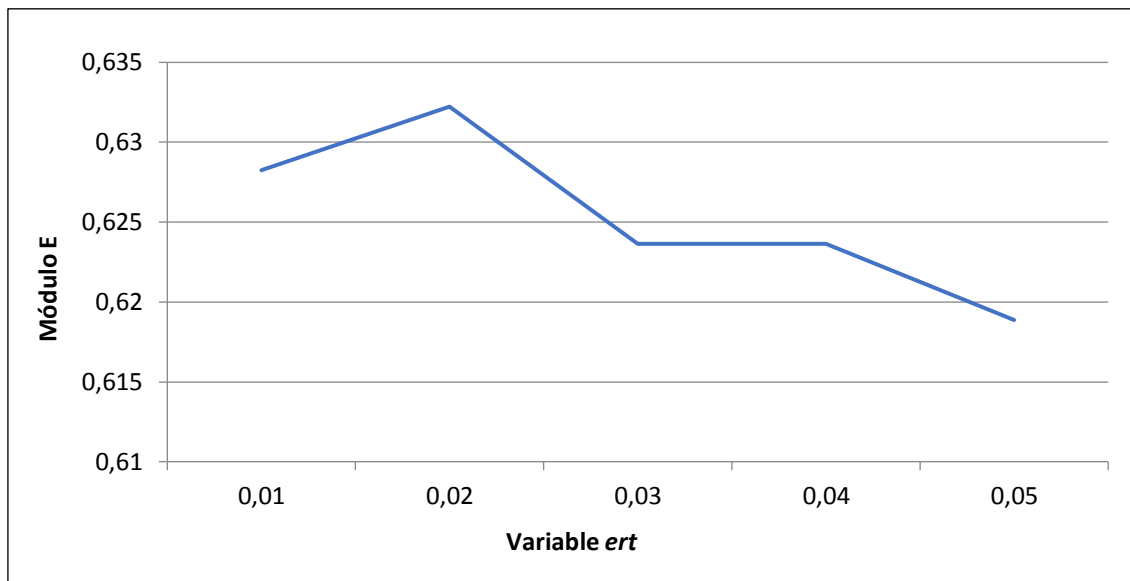


Figura 24. Evolución del valor del módulo de Young en función de la variable ert

Como se puede observar en la Tabla 2, el mayor valor del módulo de Young es el correspondiente al valor de la variable $ert=0.02$, predeterminado en el script en Phyton. Por tanto, se puede llegar a la conclusión de que la variable ert recogida en el script es una variable óptima dentro del intervalo analizado. Cabe destacar que, tanto los esfuerzos soportados por el volumen elemental como la distribución de material tras la optimización, no sufren variaciones significativas a la hora de modificar el valor del parámetro a analizar.

4.3. Parámetro r_{min}

De forma similar al apartado anterior, en este apartado se va a analizar el resultado de las diferentes optimizaciones como resultado de variar el parámetro r_{min} dentro del intervalo señalado en el apartado 4.1.

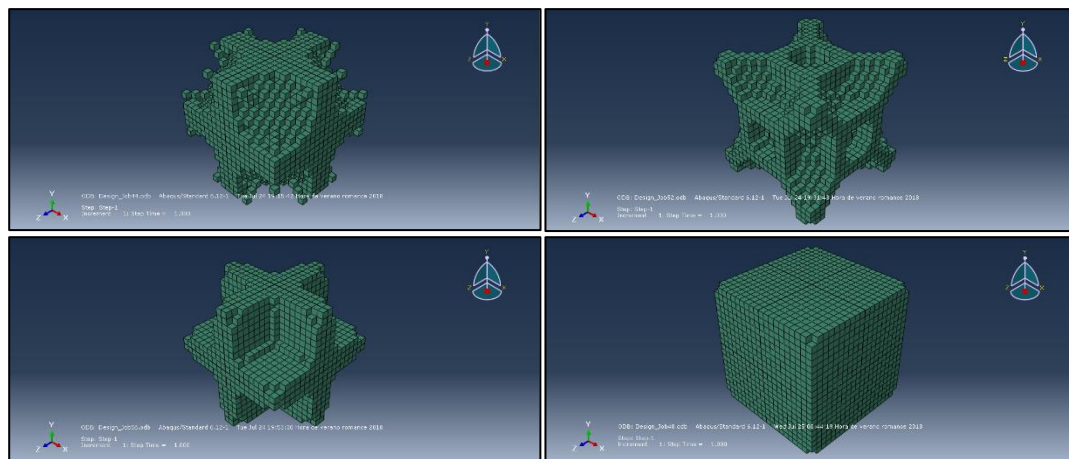


Figura 25. Resultados de la optimización del volumen elemental total con valores de r_{min} de 1, 2, 4 y 5

Una vez se han realizado los cuatro casos y se han averiguado los valores del módulo de Young asociados a cada valor de la variable r_{min} , se comparan en la Tabla 3 para determinar cuál es mayor.

Tabla 3. Valores del módulo de Young en función del parámetro r_{min}

Valor del parámetro r_{min}	Módulo de Young (MPa)
1	0.582
2	0.620
3	0.632
4	0.645
5	0.631

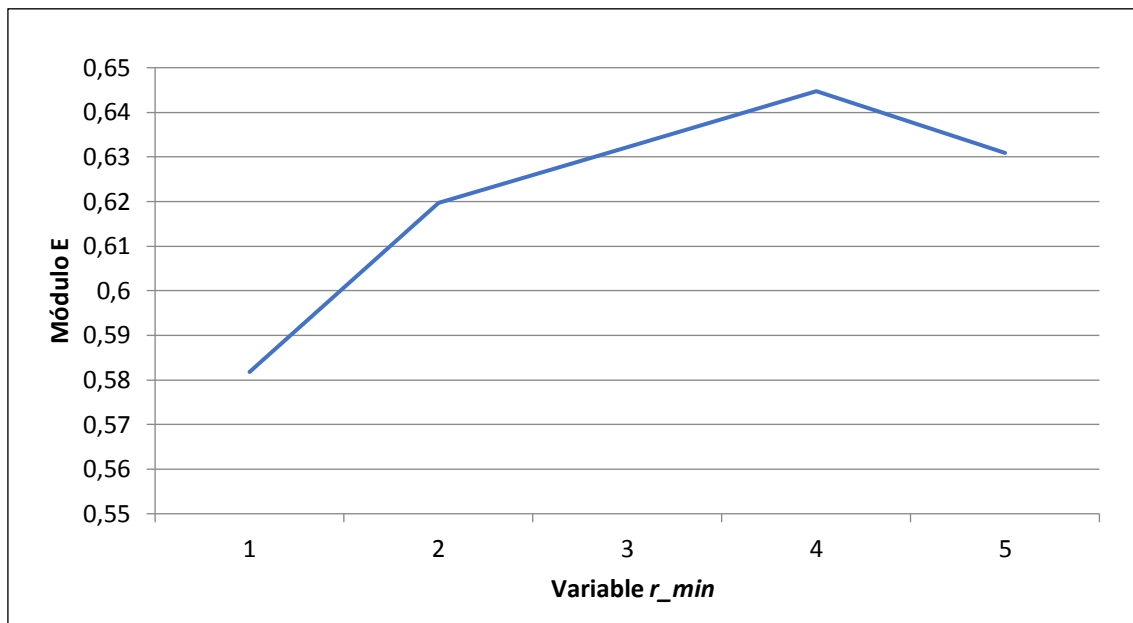


Figura 26. Evolución del valor del módulo E en función de la variable r_{min}

Como se puede observar, el mayor valor del módulo de Young corresponde al valor de $r_{min}=4$, el cual difiere del valor preestablecido en el programa ($r_{min}=3$). Por tanto, se elegirá el valor de 4 como valor óptimo para posteriores análisis. Como apunte, cabe resaltar la gran diferencia que hay en los resultados de las distintas optimizaciones según el valor que tome la variable a analizar, lo que da cuenta de que dicha variable r_{min} es muy sensible a la hora de optimizar volúmenes.

4.4. Parámetro p

La última variable por analizar es la variable p , la cual se va a modificar en el mismo intervalo que la variable r_{min} , es decir, con los valores 1, 2, 4 y 5. Utilizando el mismo procedimiento, se muestran los resultados de las optimizaciones cuando dicha variable toma estos valores.

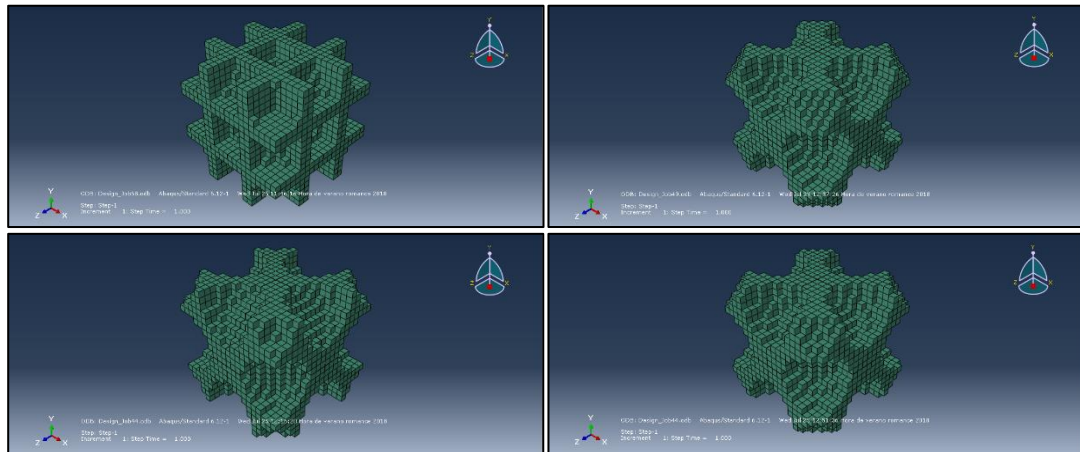


Figura 27. Resultados de la optimización del volumen elemental total con valores de p de 1, 2, 4 y 5

Tras realizar las cuatro optimizaciones necesarias, se muestran los valores del módulo de Young en la Tabla 4 para su comparación.

Tabla 4. Valores del módulo de Young en función del parámetro p

Valor del parámetro p	Módulo de Young (MPa)
1	0.606
2	0.594
3	0.632
4	0.627
5	0.602

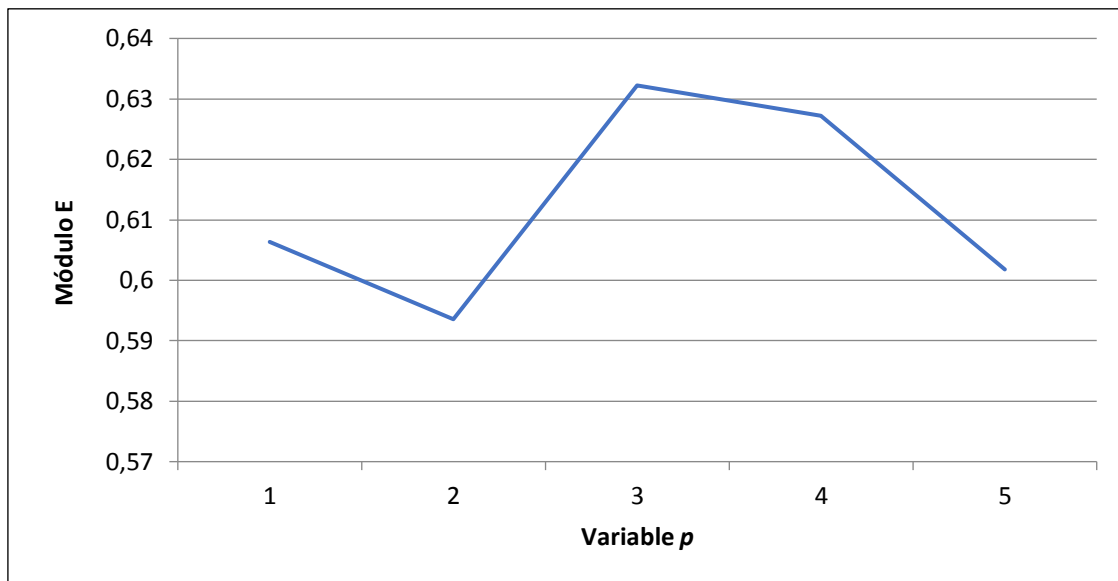


Figura 28. Evolución del valor del módulo E en función de la variable p

A la vista de los resultados, se puede afirmar que el valor óptimo de p es 3, correspondiente al mayor valor del módulo de Young de 0.632 MPa.

4.5. Parámetros óptimos

Una vez realizados todos los ensayos paramétricos de optimización sobre el volumen elemental, se tienen todos los valores del módulo de Young asociados a los distintos valores de las variables. Tras elegir los de mayor valor, se puede asegurar cuáles son los valores de dichas variables que optimizan un volumen elemental sometido a un estado de cargas, las cuales se recogen en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores óptimos de las variables ert , r_{min} y p

Variable	Valor
ert	0.02
r_{min}	4
p	3

Estos valores óptimos quedarán fijos y se utilizarán como base para posteriores análisis de optimización que se realicen sobre el volumen elemental, al igual que la configuración de volumen recogida en el apartado 3.2.3.

Capítulo 5: Análisis en franja de volúmenes

En este capítulo se analizará el volumen elemental elegido en el capítulo 2 bajo distintos porcentajes de fracción de volumen, del 10 al 90%. Para ello, se realizará el mismo proceso de optimización que en el capítulo 3, solo que en este análisis la variable que se modificará será v_f , correspondiente a la fracción de volumen, o lo que es lo mismo, al nivel de porosidad que tendrá el volumen elemental. Este volumen será sometido a un estado de cargas distinto al que ha soportado en el resto de análisis, en este caso será un ensayo de tracción uniaxial.

Posteriormente, se analizará el valor del módulo de Young en cada fracción de volumen y se estudiará la evolución de estos valores a medida que aumenta el nivel de porosidad del volumen analizado.

5.1. Condiciones iniciales

Para realizar el análisis en franja de volúmenes, hay que establecer en primer lugar las condiciones iniciales en las que se va a realizar. A diferencia de los ensayos anteriores en los que se hallaba el valor del módulo de Young mediante un ensayo triaxial, en este caso se va a realizar media un ensayo uniaxial en el eje X.

Por tanto, las condiciones de contorno en este apartado se limitan a una restricción de movimiento y a la imposición de un desplazamiento de 0.01 mm únicamente en las caras del volumen elemental perpendiculares a la dirección X.

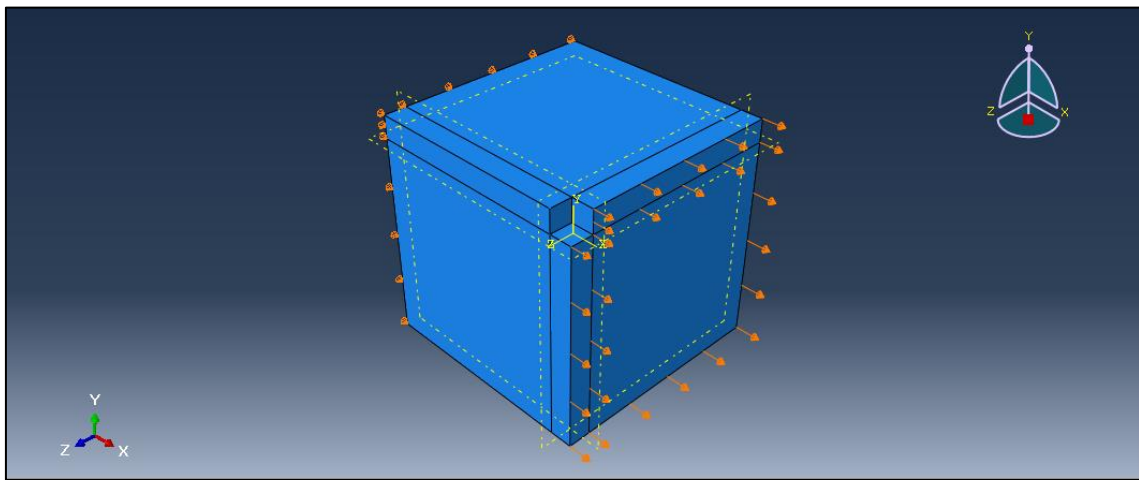


Figura 29. Condiciones de contorno aplicadas al volumen elemental para el análisis de fracción de volumen

Con estas condiciones se logra un resultado del módulo de Young más próximo a condiciones reales que si fuera un ensayo triaxial en el caso del análisis en fracción de volumen.

5.2. Ensayos en función de la variable v_f

Tras establecer las bases del ensayo, se procede a modificar la variable v_f en el script en Phyton, dándole el valor correspondiente a cada nivel de porosidad. Estos valores se moverán en un intervalo de 0.1 a 0.9, equivalentes a un nivel de fracción volumétrica del 10 al 90% en intervalos de 10%. En los siguientes ensayos se evaluará el valor del módulo de Young del volumen elemental con distintos niveles de porosidad para establecer una relación entre la cantidad de material utilizado y la resistencia a las cargas de este.

En primer lugar, se modifica el valor de la variable v_f en el script de Phyton para asignarle el porcentaje referido a la fracción de volumen. Tras este paso, se ejecuta el script con Abaqus para que comience la optimización. Una vez el programa acaba de iterar, se muestran los resultados.

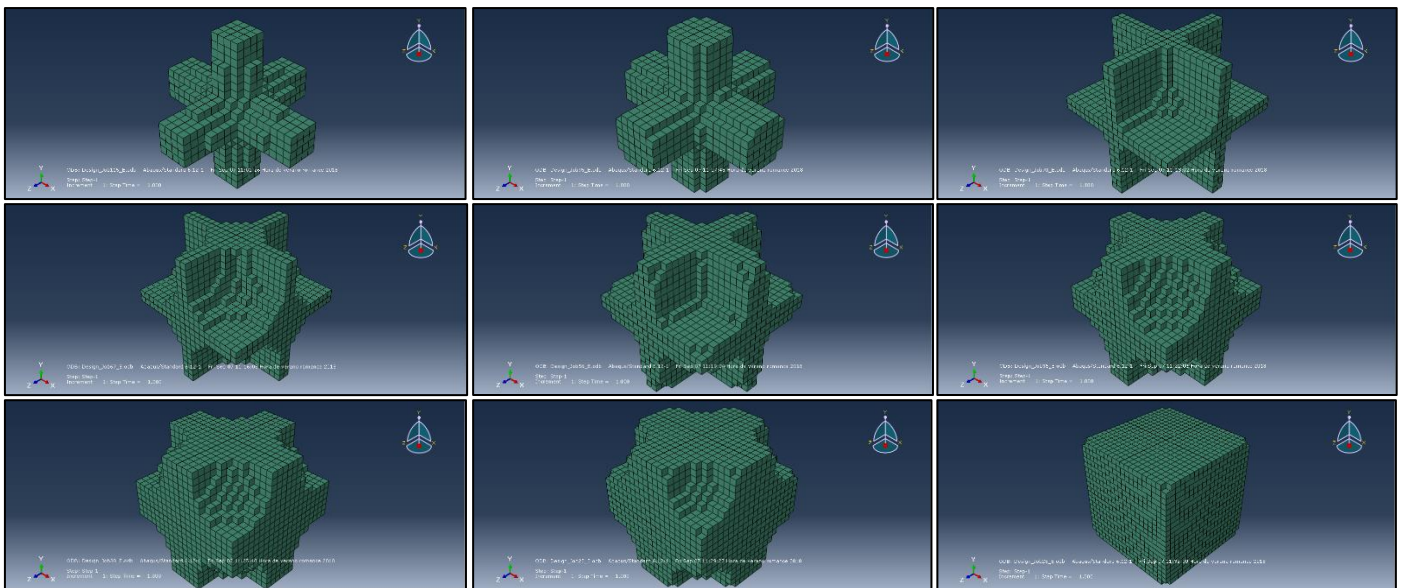


Figura 30. Resultados de la optimización del volumen elemental total con fracción de volumen del 10 al 90%

Como se puede observar, el resultado de la optimización varía notablemente dependiendo del valor de la fracción de volumen utilizada. Se aprecia el aumento de la cantidad de material del volumen elemental total a medida que disminuye el valor de la porosidad del volumen hasta llegar al cubo macizo con una franja de volumen del 90%.

5.3. Valoración de resultados

Tras realizar los ensayos con las diferentes fracciones de volumen, y una vez obtenidos todos los correspondientes valores del módulo Young, se clasifican y se recogen en la Tabla 6 para su comparación.

Tabla 6. Valores del módulo de Young en función de la variable vf.

Valor de la variable vf	Valor del módulo de Young (MPa)
0.1	0.054
0.2	0.090
0.3	0.215
0.4	0.283
0.5	0.372
0.6	0.405
0.7	0.507
0.8	0.649
0.9	0.812

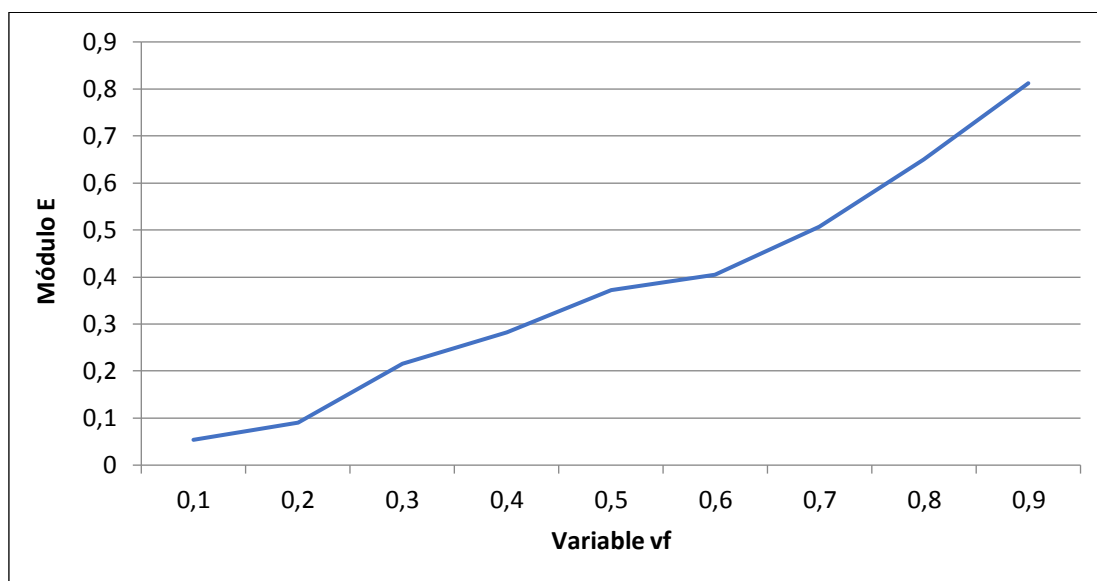


Figura 31. Evolución del módulo de Young en función de la variable vf

A la vista de los resultados, se puede deducir que el valor del módulo de Young aumenta a medida que aumenta la fracción de volumen del volumen elemental y, por consiguiente, disminuye la porosidad. Se puede comprobar que el ensayo se realizó correctamente, ya que los valores del módulo E no superan en ningún caso el valor introducido al principio del trabajo (ver Figura 5). Cabe destacar también que, como se puede ver en la Figura 31, el aumento de los valores del módulo de Young se realiza de

una forma aproximadamente regular, por lo que se puede suponer que la variable v_f es un parámetro bastante estable.

Capítulo 6: Aplicación del método de optimización en casos reales

En este capítulo, se va a aplicar el análisis de optimización estudiado anteriormente a dos posibles casos prácticos, de cara a evaluar la idoneidad y viabilidad del ensayo de optimización en casos reales.

En primer lugar, se va a evaluar el boceto de un soporte de estantería, para mostrar un caso muy visible en el día a día y para poder establecer una comparación entre el resultado obtenido con la optimización y un modelo real.

En segundo lugar, se va a analizar un caso algo más complejo como puede ser un puente, de cara a estimar la idoneidad de este modelo de optimización en casos más estrechamente relacionados con la ingeniería y la optimización de material.

Por último, se mostrarán las conclusiones de los dos análisis realizados.

6.1. Soporte de estantería

El primer caso práctico al que se le va a aplicar el método de optimización es a un soporte de forma cuadrada, de 0.2 mm de lado y espesor muy pequeño comparado con su superficie, que simula el soporte de una estantería. Por tanto, las condiciones de contorno aplicadas al sólido a analizar consisten en una restricción del movimiento a lo largo de un lateral, simulando el estar anclado a la pared, y una carga variable en la parte superior, de valor nulo en la arista común con el empotramiento y de valor máximo en el extremo opuesto, simulando el peso soportado por la estantería.

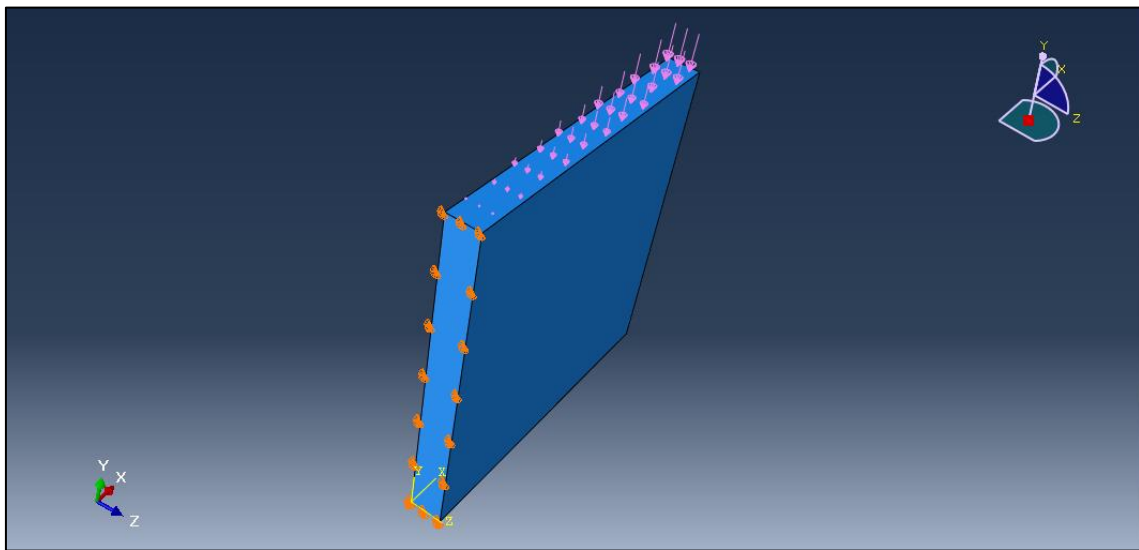


Figura 32. Condiciones de contorno aplicadas al soporte de estantería

Una vez aplicadas las condiciones de contorno a la pieza, se comienza la optimización. El valor de las variables del script en Python con las que va a trabajar Abaqus son las variables óptimas resultantes tras el análisis del capítulo 4 (ver apartado 4.5). Los ensayos realizados en este capítulo se basarán en una fracción de volumen del 50%. A continuación, se muestra el resultado de la optimización.

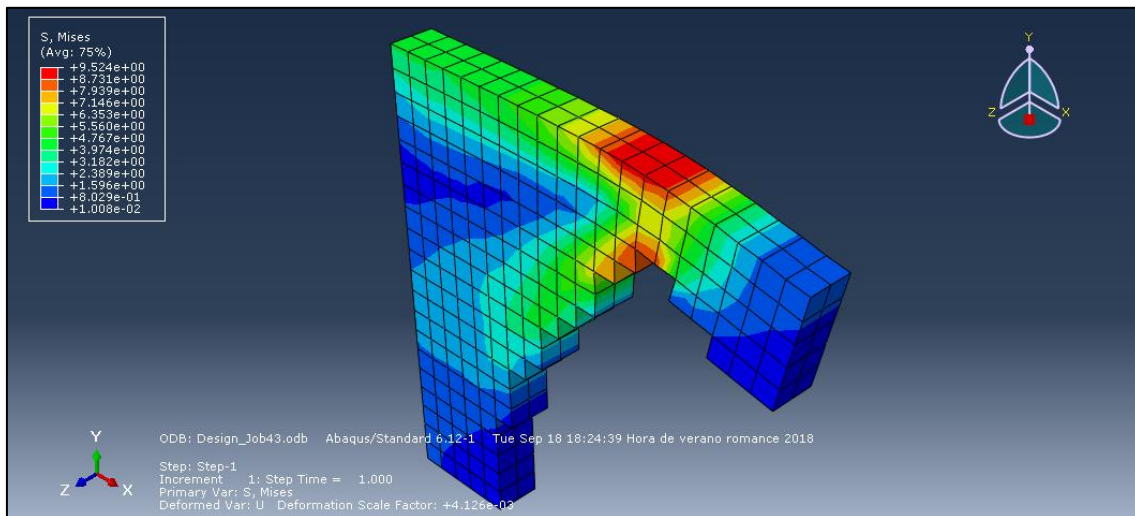


Figura 33. Representación de las deformaciones sufridas por el soporte de estantería

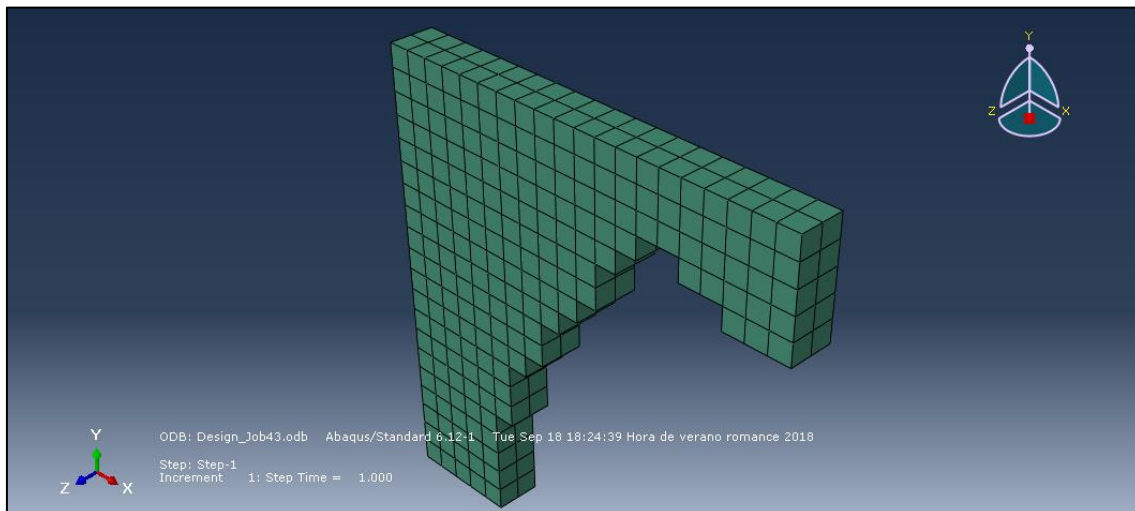


Figura 34. Resultado de la optimización del soporte de estantería

Como se puede observar en las figuras 33 y 34, el script ha eliminado material de la zona donde menos esfuerzos se estaban soportando, dando lugar a una forma de soporte muy similar a la que suelen tener ciertos soportes en la realidad. Con esto se puede demostrar que el script de optimización es válido para casos reales, ya que los resultados de esta optimización se acercan en gran medida a casos reales ya existentes, teniendo en cuenta que las propiedades del material introducidas pertenecen a un material ficticio (el mismo que al inicio del capítulo 3), que sirve únicamente de referencia para ver la variación del módulo de Young durante la optimización.

6.2. Puente

El segundo caso práctico que se va a someter al análisis de optimización es la simulación de un puente, el cual va a estar sometido a una restricción de movimiento en dos zonas en los extremos de la base, y va a soportar dos tipos de carga: una de valor fijo a lo largo de la superficie del puente y otra variable, de valor nulo en los extremos y de valor máximo en el centro de la estructura. Al igual que en el caso anterior, el grosor del puente es mucho menor que el resto de dimensiones del mismo. Se consideran las mismas variables óptimas que en el caso anterior, con una fracción de volumen igual del 50%.

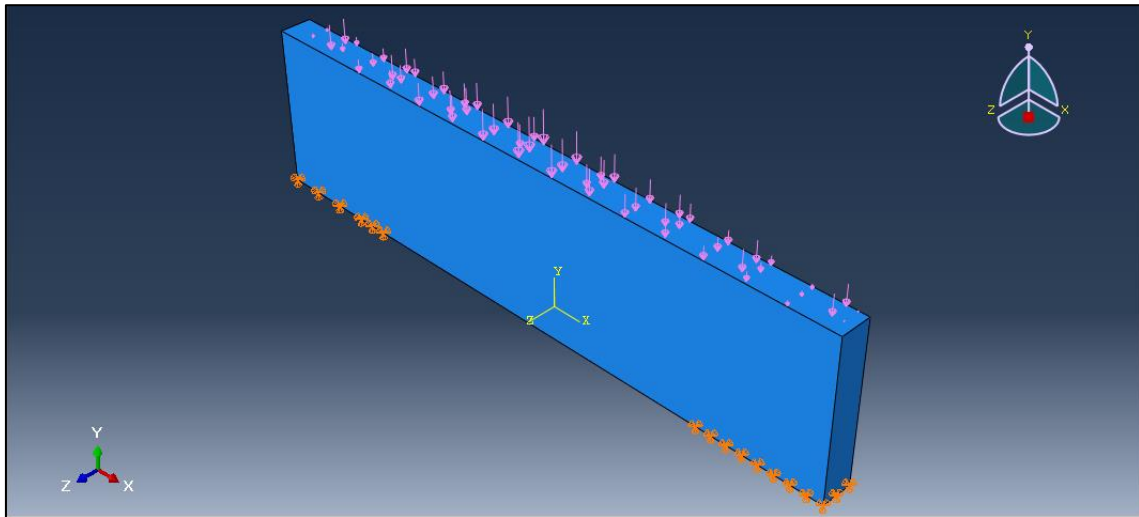


Figura 35. Condiciones de contorno aplicadas al puente

Con estas condiciones, se ejecuta el script en Abaqus para que comience la optimización. Tras finalizarla, se muestran los resultados.

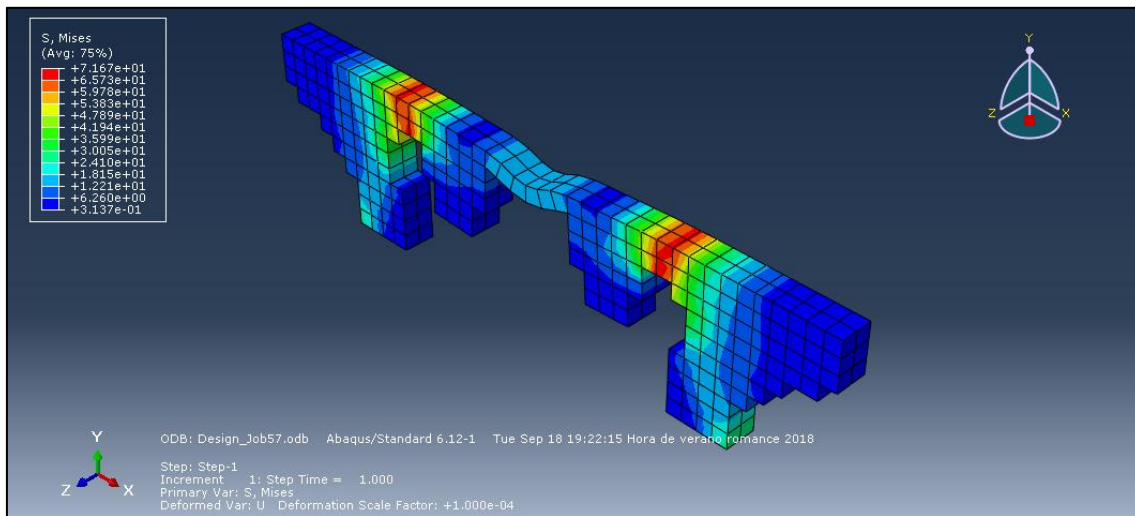


Figura 36. Representación de las deformaciones sufridas por el puente

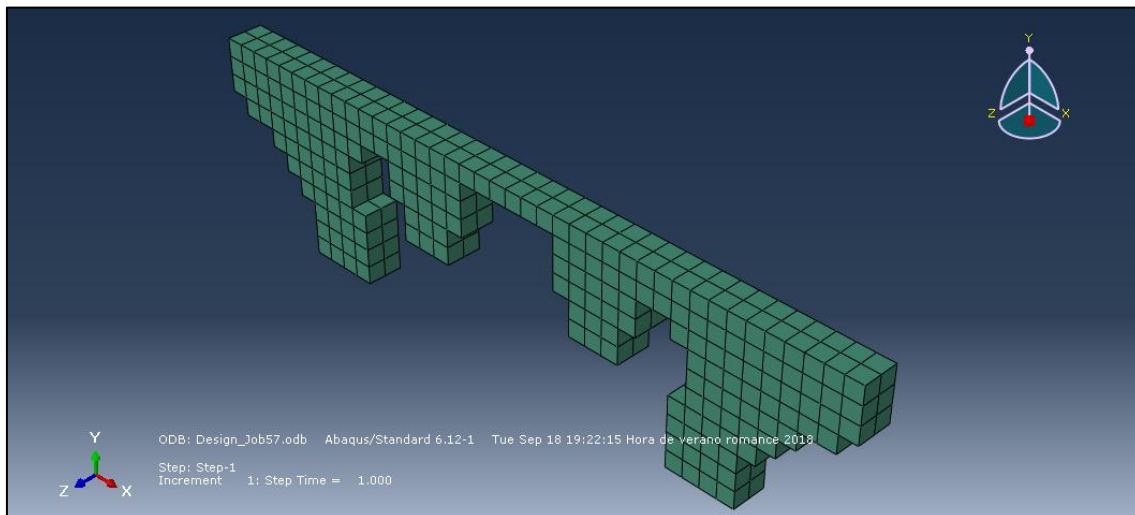


Figura 37. Resultado de la optimización del puente

A la vista de los resultados, se puede confirmar lo que se comentó en la optimización del soporte de estantería. La forma adquirida resultado de la optimización se asemeja mucho a la de un puente en la realidad. Este hecho, teniendo en cuenta las propiedades del material que se han utilizado y las cargas ficticias que se han impuesto, da buena cuenta de la fiabilidad de este script y de los valores escogidos para las variables incluidas en el mismo script.

6.3. Valoración de resultados

En este capítulo se han evaluado dos posibles casos reales a los que se les puede aplicar el método de optimización por elementos finitos. A la vista de los resultados, se puede confirmar que este método es perfectamente aplicable a casos prácticos, dado que la optimización realizada a los dos objetos analizados concuerda con la forma real que pueden tener dichos objetos.

Sin embargo, el principal problema en el que se tiene que seguir trabajando es en perfeccionar el script que ejecuta el programa Abaqus/CAE, ya que, si bien es muy bueno y los resultados son altamente satisfactorios, no se consiguen formas totalmente ajustadas a la realidad, ya que tienen que ser modificadas posteriormente, tomando el resultado de la optimización como base, para adecuarse a un uso real.

Capítulo 7: Conclusiones de los análisis basados en el método de optimización BESO

La base del presente trabajo es el método de optimización mediante elementos finitos BESO. La finalidad de la utilización de este método es la de analizar los resultados que se consiguen al optimizar una serie de volúmenes elementales sometidos a un estado de cargas. Estos volúmenes tienen una particularidad reseñable de cara a los resultados: a todos ellos se les ha eliminado una pequeña fracción de su volumen a la hora de ser ensayados. Con esto, se consigue desestabilizar al modelo para que el ensayo no sea homogéneo, ya que el resultado de la optimización no sería digno de estudio. Así, el reparto de cargas dentro del volumen elemental no se distribuye de manera uniforme, lo que da lugar a resultados distintos dependiendo de la zona del volumen que se retire, y a valores del módulo de Young ligados a las diferentes configuraciones. Esto permite descartar modelos más ineficientes a favor de modelos con un mayor grado de resistencia a los esfuerzos.

Una segunda parte del estudio han sido las variables más relevantes dentro del método de optimización, cuya función se explicó en el capítulo 2.2. Se ha visto que estas variables, ert , r_{min} y p , alteran de forma considerable el resultado de la optimización dependiendo del valor que adopten. Se han analizado dentro de unos rangos cercanos a los valores que vienen predeterminados en el script para que los resultados se aproximen a resultados posibles físicamente. Además, se debe añadir que el tamaño de malla es relativamente grande comparado con los ensayos que se suelen realizar con este tipo de método de optimización, pero en este caso se ha preferido así para que la diferencia entre resultados sea destacable.

A continuación, el análisis se ha centrado en la variación de la franja de volumen del elemento objeto del ensayo, utilizando para ello la configuración y el valor de los parámetros óptimos hallados anteriormente. A la vista de los resultados, se puede afirmar que para valores de fracción de volumen inferiores al 30% o superiores al 80%, el resultado de la optimización difiere del resultado esperable, ya que, para valores inferiores al 30%, la estructura es demasiado débil debido al alto porcentaje de porosidad, y para valores superiores al 80%, la optimización es prácticamente nula.

Por último, a la hora de aplicar el método de optimización a estructuras reales, se ha visto que el resultado es bastante satisfactorio, todo ello con unos valores de fracción de volumen del 50%. Tanto el soporte de estantería como el puente adoptan formas reales físicamente tras la optimización, si bien el resultado no es del todo aplicable a la realidad sin modificaciones, debido en parte al tamaño de la malla, como se comentó anteriormente, y a las debilidades presentes aún en el método BESO.

Como conclusión, se puede afirmar que el método de optimización BESO es un buen camino de cara a la optimización de estructuras, con resultados satisfactorios y aplicación posible en la realidad. Sin embargo, este método, al igual que otros métodos de optimización, debe seguir siendo investigado para la corrección de los fallos que pueda aún tener, pero no se descarta que en un futuro próximo estos métodos se empiecen a utilizar en masa para la producción de ciertos objetos y estructuras presentes en la realidad de forma repetitiva para abaratar costes, así como su progresiva implantación en campos como la aeronáutica o la biomedicina, donde el ahorro de material y la eficiencia de construcción son fundamentales para la viabilidad de los proyectos.

Capítulo 8: Planificación del proyecto y presupuesto

8.1. Planificación del trabajo

El presente trabajo fue asignado en mayo de 2018, estableciendo unas pautas claras sobre el tema a tratar y el software que se debía utilizar. Así pues, con prácticamente 5 meses de plazo, de mayo a septiembre ambos inclusive, se comenzó a trabajar en el proyecto.

Al inicio, se comenzaron con las simulaciones y los ensayos en Abaqus/CAE siguiendo las instrucciones dadas por el tutor, Miguel Marco. Estos ensayos se prolongaron durante los tres primeros meses (de mayo a julio) con el fin de obtener todos los resultados y de corroborar que se estaban realizando correctamente los análisis. En primer lugar, se realizaron los ensayos para la elección de la configuración de volumen elemental más apropiada para resistir las cargas a las que se veía sometido. A continuación, se realizaron los ensayos modificando las variables, tanto las variables ert , r_{min} y p , como la fracción de volumen. Por último, se realizaron los análisis en casos prácticos tomando como base los resultados de los ensayos previos. El total de días dedicados a los ensayos es de 90 días.

Posteriormente, se comenzó con la búsqueda de bibliografía para ilustrar la parte del trabajo previa a los ensayos y para el contraste de los resultados obtenidos con otros ensayos realizados utilizando el mismo método. Esta tarea ocupó todo el mes de agosto, por lo que los días utilizados para la búsqueda de bibliografía son 30 días.

Por último, se comenzó a la escritura del presente trabajo. Esto comenzó en la segunda quincena del mes de agosto, por lo que se realizó en parte simultáneamente con la búsqueda de bibliografía. Esta tarea ocupó desde la fecha del 15 de agosto hasta aproximadamente un mes después, por lo que fueron 30 días los que se invirtieron en la redacción de la memoria.

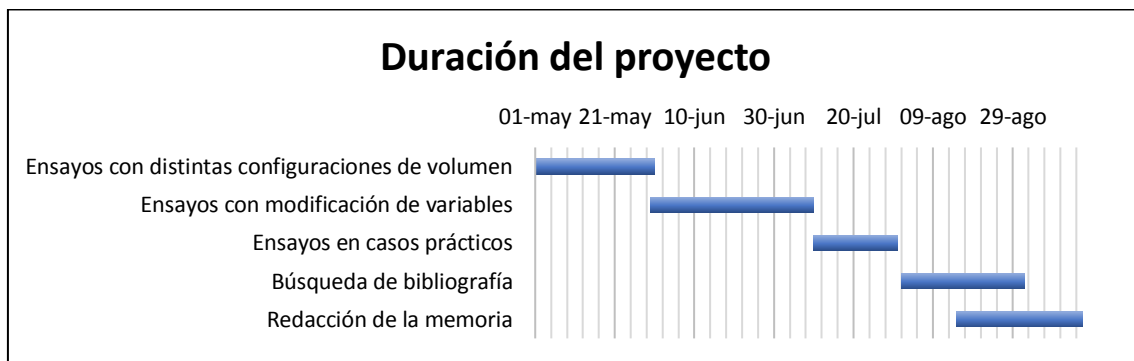


Figura 38. Esquema del desarrollo del proyecto

8.2. Presupuesto

Para la realización del proyecto se ha utilizado diferente material informático, tanto equipos como software. También se ha contado con el trabajo del tutor y del propio alumno. Todo ello se recogerá en este capítulo.

En el apartado de medios materiales, se han utilizado dos equipos informáticos para la realización del proyecto, uno para la redacción de la memoria y otro para la ejecución de los ensayos. El motivo de esto ha sido evitar el consumo excesivo de los recursos de un solo ordenador, lo cual se pudiera traducir en fallos en la ejecución del script o ralentizaciones a la hora de realizar los ensayos. Por otro lado, se han utilizado dos tipos de software, un programa de análisis por elementos finitos como Abaqus/CAE y un programa para la edición del script como Notepad++. La licencia del primero ha sido suministrada por la Universidad Carlos III de Madrid, mientras que el programa Notepad++ es software libre de uso gratuito.

En el apartado de coste de personal, se estima que se han invertido 3 horas diarias, 5 días a la semana, para la realización de los ensayos, mientras que para la búsqueda de bibliografía y para la redacción de la memoria se han invertido 4 horas diarias durante 5 días a la semana, lo que da un cómputo total de 340 horas invertidas por el alumno. Por parte del profesor, se estima que la suma total de horas de tutorías alcanza las 40 horas.

Tabla 7. Desglose del presupuesto del proyecto

Coste de hardware				
Equipo	Coste de adquisición (€)	Amortización mensual (€)	Periodo de utilización (meses)	Coste total (€)
Ordenador ASUS A52J	420	17.5	5	87.5
Ordenador ASUS K55V	600	25	5	125
Coste de software				
Software	Coste de licencia (€)	Amortización mensual (€)	Periodo de utilización (meses)	Coste total (€)
Abaqus	5400	225	5	1125
Coste de personal				
Profesión	Horas trabajadas	Coste por hora (€)	Coste total (€)	
Ingeniero	40	40	1600	
Estudiante	340	15	5100	

Tras realizar el desglose del presupuesto gastado en el proyecto, en la Tabla 8 se recoge el coste total del proyecto realizado.

Tabla 8. Coste total del proyecto

Coste de hardware (€)	212.5
Coste de software (€)	1125
Coste de personal (€)	6700
Coste total (€)	8037.5

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Victoria Nicolás, “Optimización de forma y topología con malla fija y algoritmos genéticos”, Tesis doctoral, Dpto. de Estructuras y Construcción, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España, 2006. [En línea]. Disponible en: <http://www.upct.es/goe/tesis/tesisMVN.pdf>
- [2] J. Cadman et al., “Bioinspired lightweight cellular materials – Understanding effects of natural variation on mechanical properties”, *Materials Science and Engineering: C*, vol. 33, nº 6, pp. 3146-3152, ago. 2013.
- [3] L. Siva Rama Krishna, N. Mahesh y N. Sateesh, “Topology optimization using solid isotropic material with penalization technique for additive manufacturing”, *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, nº 2, parte A, pp. 1414-1422, 2017.
- [4] X. Huang y Y.M. Xie, “Evolutionary topology optimization of continuum structures including design-dependent self-weight loads”, *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 47, nº 8, pp. 942-948, ago. 2011.
- [5] X. Huang, A. Radman y Y. M. Xie, “Topological design of microstructures of cellular materials for maximum bulk of shear modulus”, *Computational Materials Science*, vol. 50, nº 6, pp. 1861-1870, abr. 2011.
- [6] P. Uarac, P. Cendoya y J. P. Sanhueza, “Optimización topológica bidireccional con esquema de penalización de material y restricciones de desplazamiento”, *Ingeniare*, vol. 23, nº 1, pp. 75-84, ene. 2015.
- [7] Z. Xiao et al., “Evaluation of topology-optimized lattice structures manufactured via selective laser melting”, *Materials & Design*, vol. 143, pp. 27-37, abr. 2018.